أساسيات الحراريات والموائع

الديناميكا الحرارية

الديناميكا الحرارية

٤

الوحدة الرابعة : الديناميكا الحرارية

الجدارة: الإلمام بأسس ومبادئ الديناميكا الحرارية وكيفية تطبيق القانون الأول والقانون الثاني للديناميكا الحرارية على دوائر وأجهزة التبريد والتكييف.

الأهداف:

عندما تكمل هذه الوحدة تكون قادراً على:

١. معرفة الخواص الفيزيائية للمادة.

٢. معرفة الشغل و الحرارة و الفرق بينهما.

٣. معرفة القانون الأول للديناميكا الحرارية و الطاقة الداخلية.

٤. معرفة القانون الثاني للديناميكا الحرارية.

٥. معرفة مختلف التطبيقات على القانون الأول للديناميكا الحرارية في دوائر التبريد وتكييف الهواء.

٦. معرفة مختلف التطبيقات على القانون الثاني للديناميكا الحرارية في دوائر التبريد وتكييف الهواء.

مستوى الأداء المطلوب:

أن لا تقل نسبة إتقان هذه الجدارة عن ٩٠٪.

أن يصل المتدرب إلى الإتقان الكامل لهذه الجدارة وبنسبة ١٠٠٪.

الوقت المتوقع للتدريب:

١٥ ساعة دراسية (نظرية).

الوسائل المساعدة:

١. ستحتاج إلى الرجوع إلى مقرري الفيزياء التخصصية والرياضيات التخصصية.

٢. القيام بإجراء التطبيقات في الوحدة الخامسة القسم الثالث.

متطلبات الجدارة:

طالما أنه لا يوجد شيء قبل هذه المهمة يجب التدرب على جميع المهارات لأول مرة.

الديناميكا الحرارية Thermodynamics

مقدمة :

تلعب الديناميكا الحرارية دوراً هاماً في تحليل الأنظمة والأجهزة التي يعتمد تصميمها وعملها على عمليات انتقال الطاقة وتحويلها من شكل إلى آخر. وتعتبر الثورة الصناعية نتيجة حتمية لاكتشاف كيفية استخدام الطاقة وكيفية تحويل الطاقة الحرارية إلى شغل مفيد. إن معظم نشاطاتنا اليومية تحتوي على انتقال وتحويل وتغيير الطاقة. فجسم الإنسان نظام بيولوجي تتحول فيه الطاقة الكيميائية للغذاء لطاقات أخرى مختلفة يستفيد منها الإنسان. كما أن هناك تطبيقات هندسية عديدة تحتوي على انتقال وتحويل الطاقة نجدها في حياتنا اليومية. فنظم ومكونات التبريد وتكييف الهواء تعتمد أساسا على انتقال الطاقة في كثير من أجزائها..فتستخدم نظم التبريد الشغل الذي يعطيه المحرك الكهربي لنقل الحرارة من الغرف المبردة، فالفريونات تمتص تلك الحرارة لتتبخر في المبخر فتترك تأثيراً تبريدياً في الأماكن التي يراد تبريدها. ومحطات توليد الطاقة الكهربية ومحركات السيارات تتحول فيها الطاقة الكيميائية للوقود إلى شغل ميكانيكي عندما يشتعل خليط من الهواء والوقود فيسبب حركة توربينة أو مكبس.

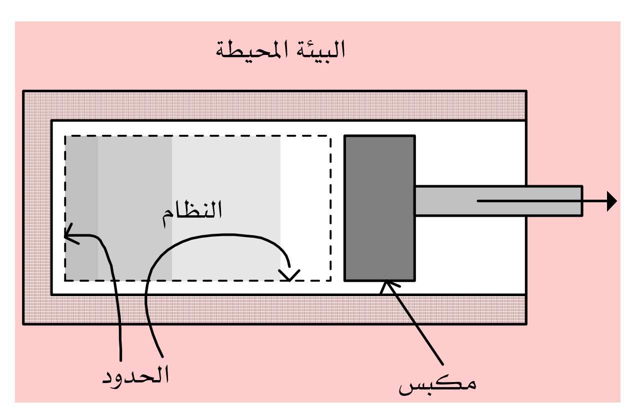
الفصل الأول

مفاهيم وتعاريف ثيرموديناميكية

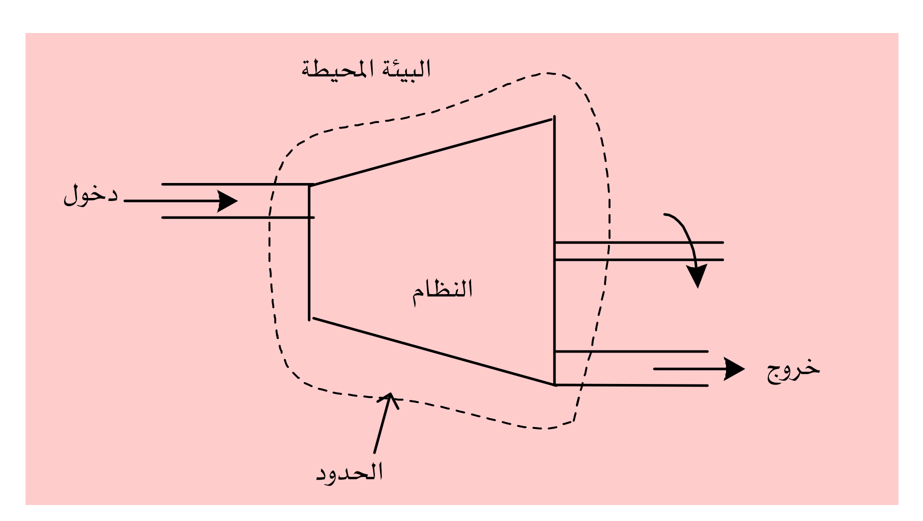
Thermodynamic Concepts & Definitions

النظام : System

يعرف النظام في علم الديناميكا الحرارية بأنه تلك المنطقة الخاصة في الفراغ التي يحسب لها انتقال الطاقة والكتلة. كما يمكن أن يعرف بأنه المادة الموجودة في حيز معين له حدود معينة وتكون تحت الدراسة. هذه الحدود boundaries يمكن أن تكون حدوداً ثابتة أو متحركة، فمثلا إذا قمت بحساب الطاقة والكتلة لمخزن تبريد مغلق فإن جدران المخزن هي حدود المنظومة أو النظام وهي ثابتة أما إذا أجريت هذه الحسابات على المائع في منظومة المكبس و الأسطوانة فإن جدران الأسطوانة وسطح المكبس هي حدود النظام وفي هذه الحالة وبما أن المكبس يتحرك فإن الحدود في هذه الحالة تسمى حدوداً متحركة flexible . تسمى المنطقة خارج المنظومة بالمحيط المكتنف surroundings أو البيئة المحيطة. يسمى النظام نظاماً مغلقاً closed system إذا كانت كتلته ثابتة ويتبادل الطاقة فقط مع الوسط المحيط. ويكون النظام نظاماً مفتوحاً open system إذا كانت هناك عملية تبادل في الكتلة والطاقة مع الوسط المحيط. ويوضح شكل (٤- ١) مثالاً لنظام مغلق وشكل (٤- ٢) مثالاً لنظام مفتوح.



شكل (٤ ـ ١)النظام المغلق: النظام، الحدود والبيئة المحيطة



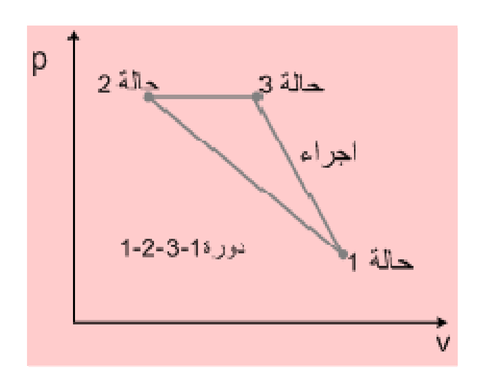
شكل (٤ ـ ٢) النظام المفتوح: النظام، الحدود والبيئة المحيطة

لكل نظام خصائص معينة تصف حالته الفيزيائية. يطلق على هذه الخصائص مصطلح "خواص "properties". من هذه الخواص درجة الحرارة، الضغط، الحجم، الكثافة، اللزوجة، السعة الحرارية. وتنقسم الخواص إلى خواص مركزة وممتدة. وتعرف الخواص المركزة intensive بأنها الخواص التي لا تعتمد على حيز النظام مثل درجة الحرارة والضغط والكثافة ،فوسط درجة حرارته مثلا 40 ^oC يكون كل جزء فيه له نفس درجة الحرارة. أما الخواص الممتدة extensive فتعتمد بالضرورة على حيز النظام،مثل الكتلة والحجم والطاقة الكلية. يلاحظ هنا أن الخاصية الممتدة لمادة متجانسة homogeneous يمكن تحويلها لخاصية مركزة وذلك بالقسمة على الكتلة.

تتحدد **حالة النظام** بواسطة قيم خواصه مثل درجة الحرارة أو الضغط وخلافه. وإذا انتقل النظام إلى حالة تكون فيها خواصه هي نفسها التي كانت في الحالة الأولى فإن المنظومة تكون عند نفس الحالة. وإذا كانت حالة النظام ثابتة فإن كل خواص النظام تكون ثابتة عند قيم معلومة. .وتحدد حالة النظام دائما بمعرفة خاصيتين من خواصه وعندئذ يمكن معرفة بقية الخواص. ويشترط في الخاصيتين اللتين تحددان حالة النظام أن تكونا مستقلتين عن بعضهما ، فمثلا الكثافة والحجم النوعي لا يمكن أن يحددا حالة نظام قط وذلك لأن الكثافة هي مقلوب الحجم النوعي وبالتالي فهما خاصيتان تعتمدان على بعضهما البعض. كذلك في حالة السوائل التي في حالة غليان أو الأبخرة التي في حالة تكثف لا يمكن تحديد حالة النظام بمعرفة الضغط ودرجة الحرارة إذ أن الضغط ودرجة الحرارة في تلك الحالات ليستا خاصيتين مستقلتين.

يحدث الإجراء الثيرموديناميكي process كلما تغير النظام من حالة إلى أخرى. فالخط 2-1 في شكل (٤- ٣) يمثل إجراء حيث يتغير فيه الضغط والحجم من حالة (1) إلى الحالة (2). ومن أمثلة الإجراءات المعروفة في الحياة العملية تمدد الغاز وانضغاطه أو تحويل الماء إلى بخار.

.وإذا تغيرت حالة نظام معين خلال سلسلة من الإجراءات من حالة ابتدائية حتى تعود إلى نفس الحالة فإن النظام في هذه الحالة يكون قد أكمل دورة ثيرموديناميكية thermodynamic cycle كما يتضح من الشكل (٤- ٣) (الدورة 1-3-2-1).



شكل(٤ ـ ٣) الحالة والإجراء والدورة

الانعكاسية Reversibility

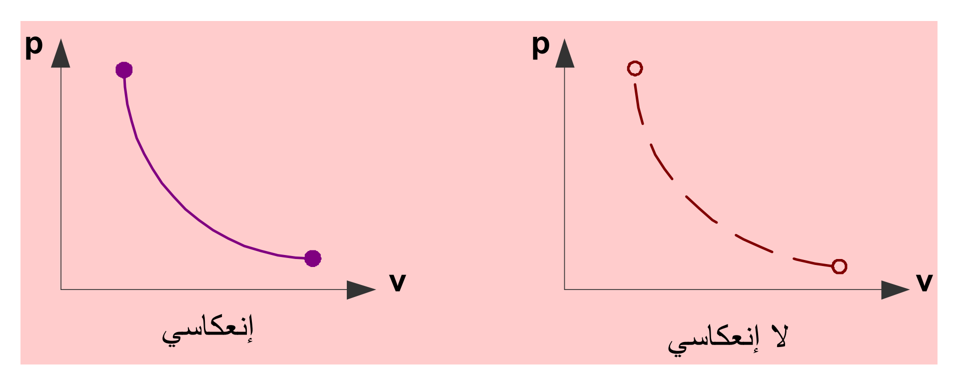
ذكرنا أن النظام يمكن أن تتغير حالته من حالة ابتدائية إلى حالة أخرى بواسطة إجراء أو عملية معينة. فإذا أمكن عكس هذا الإجراء لتعود خواص النظام إلى حالتها الابتدائية بدون أن يصاحب ذلك أي تغير على البيئة التي تحوي النظام سمي ذلك الإجراء إجراءً انعكاسياً. ويمكن في هذه الحالة أن يمثل هذا الإجراء بخط متواصل على منحنى الخواص، شكل (٤- ٤). أما الإجراءات التي لا يمكن عكسها بدون إحداث تغيير في حالة البيئة المحيطة بالنظام فتسمى إجراءات لا انعكاسية. وعلى ذلك فالعمليات التي يصاحبها فقد في الطاقة وتحتاج إلى مساعدة خارجية للوصول لحالتها الأصلية تعتبر إجراءات لا انعكاسية. وبالتالي تمثل هذه الإجراءات بخطوط متقطعة على منحنيات الخواص، شكل (٤- ٤). ومما هو جدير بالذكر أن الإجراء الانعكاسي هو إجراء نظري فقط وأن كل الإجراءات العملية الواقعية إجراءات لا انعكاسية.

من شروط الانعكاسية:

- يكون الإجراء أو العملية بدون احتكاك. (مثلاً في حالة منظومة المكبس والأسطوانة ليس هناك احتكاك بين المكبس والأسطوانة).

- يكون الإجراء بطئاً جداً بحيث إن فرق الضغط بين النظام داخل الأسطوانة والبيئة التي حوله يساوي كمية صغيرة جداً.
- يكون الفرق في درجة الحرارة بين النظام والبيئة حوله خلال الإجراء صغيراً جدا. بمعنى أن كمية الحرارة المضافة للنظام أو المطرودة منه تساوي قيمة صغيرة جدا.

ويلاحظ تماما أن مثل هذه العملية التي تتطلب الشروط السابقة لا توجد حقيقة وبالتالي فهي فعلا عملية انعكاسية.



شكل (٤- ٤) الإجراءات الانعكاسية واللا انعكاسية

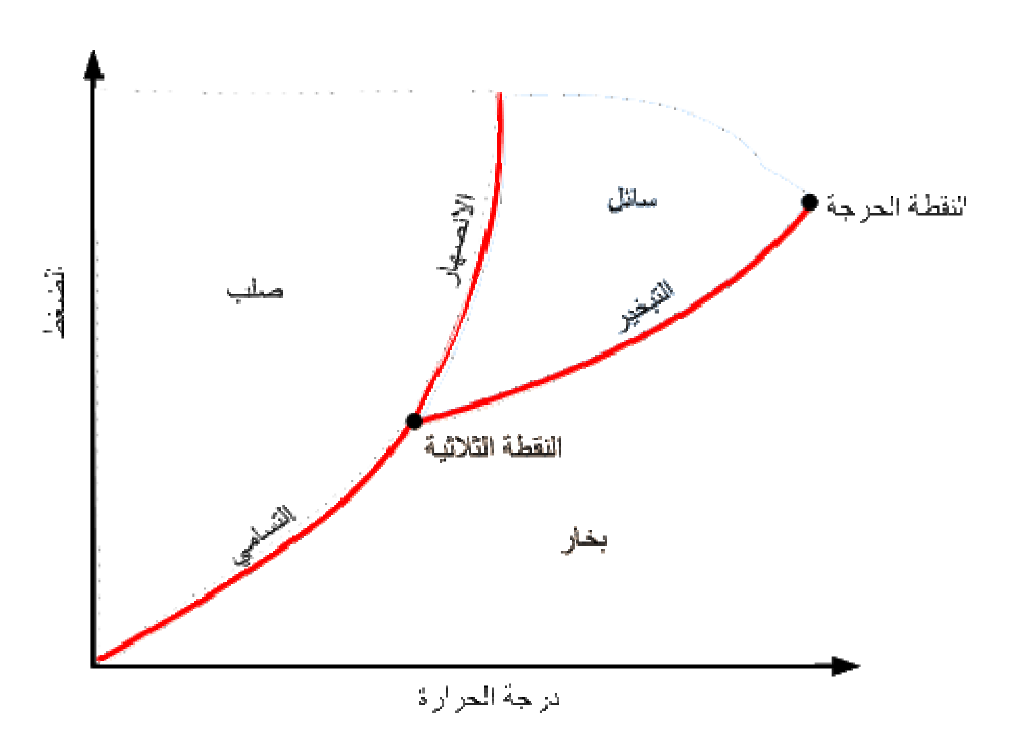
المادة النقية Pure substance

تسمى المادة التي لها تركيب كيميائي ثابت بالمادة النقية، مثل الماء والنتروجين وثاني أكسيد الكربون. وليس بالضرورة أن تكون المادة النقية مكونة من عنصر كيميائي واحد فالخليط من عدة عناصر يمكن أن يكون مادة نقية طالما كان مركبا متجانسا مثل الهواء فهو خليط من عدة غازات، أما خليط الماء والزيت فلا يعتبر مادة نقية وذلك لأن الزيت لا يذوب في الماء ويكون طبقة فوق سطح الماء مكونا جزأين منفصلين ومختلفين كيميائيا.

أحوال المادة النقية:

نعلم من التجربة اليومية أن المادة تتواجد في ثلاث حالات مختلفة، صلبة وسائلة وغازية. فعند درجة حرارة الغرفة يوجد النحاس كمادة صلبة والزئبق كسائل والنيتروجين كغاز. ومعظم المواد يمكن أن تتواجد في أي حالة من الحالات السابقة تبعا لدرجة الحرارة والضغط الواقع عليها. فالماء مثلا عند الضغط الجوي يكون في الحالة السائلة من صفر إلى ١٠٠ درجة مئوية. ويغلي عند ١٠٠ درجة ويتحول إلى الحالة الغازية (بخار). ويتجمد عند الصفر المئوي ويحول إلى الحالة الصلبة (ثلج). فإذا زاد الضغط الواقع على الماء أعلى من الضغط الجوي زادت درجة حرارة الغليان ودرجة التجمد. وعموما تعتمد درجة الغليان والتجمد للمادة النقية على الضغط الواقع عليها.

يوضح الشكل (٤- ٥) منحنى حالة المادة، فخط الانصهار يفصل بين الحالة الصلبة والسائلة بينما خط التبخير يفصل بين الحالة السائلة والغازية أما خط التسامي فهو الذي يفصل بين الحالة الصلبة والغازية وهو تحول المادة من الحالة الصلبة إلى الغازية دون المرور بالحالة السائلة. تلتقي الخطوط الثلاثة فيما يعرف بالنقطة الثلاثية حيث تتواجد المادة في حالة اتزان بأشكالها الثلاثة. ينتهي خط التبخير في النقطة الحرجة



شكل (٤- ٥) الضغط- درجة الحرارة للمادة النقية

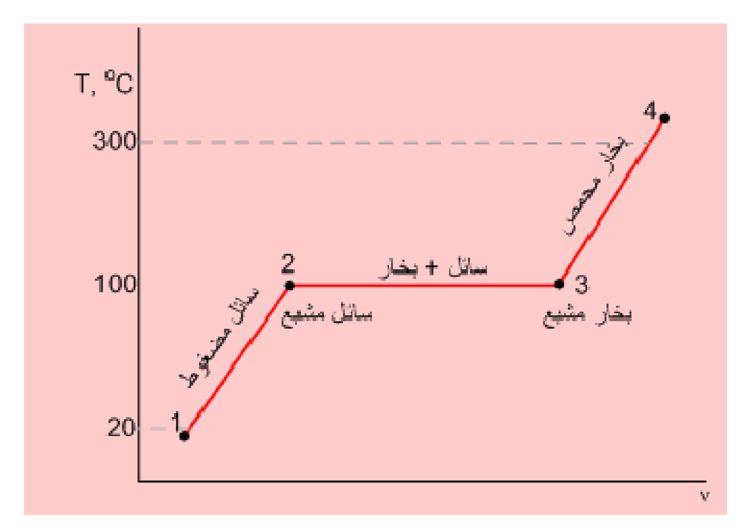
ويبين شكل (٤- ٦) منحنى تغير درجة الحرارة مع الحجم النوعي للماء حيث تتغير حالة الماء من سائل عند النقطة (1) إلى سائل مشبع عند النقطة (2) وذلك بإضافة حرارة إلي الماء. وتسمى النقطة (2) بنقطة تشبع السائل وهي تعتمد على الضغط الواقع على الماء. وتحدث هذه الحالة عند 100 °C عند الضغط الجوى 101.3 kPa. فإذا استمر إضافة الحرارة فإن الماء يتحول جزئيا إلى بخار عند نفس درجة الحرارة والتي تسمى درجة حرارة التشبع (الغليان). ويمثل الإجراء 3-2 عملية تحول الماء من سائل إلى بخار، وتسمى الحرارة التي اكتسبها الماء خلال هذا الإجراء بالحرارة الكامنة للتبخير (نظرا لتحول حالة المادة دون ارتفاع درجة حرارتها).

عندما يتحول كل الماء إلى بخار عند النقطة (3) تسمى حالة البخار بالبخار المشبع وتسمى النقطة (3) بنقطة تشبع البخار.

إذا استمرت إضافة الحرارة فإن البخار يسخن وتزداد درجة حرارته ويسمى بالبخار المحمص (4).

تسمى الحرارة المضافة في الإجراءين 1-2, 3-4 بالحرارة المحسوسة وهي الحرارة التي تسبب ارتفاع درجة حرارة المادة.

ومن الملاحظ أن الحجم النوعي للماء يزداد كلما ازدادت درجة حرارته وذلك بدءاً من $4\,^{o}C$ عند الضغط الجوي.

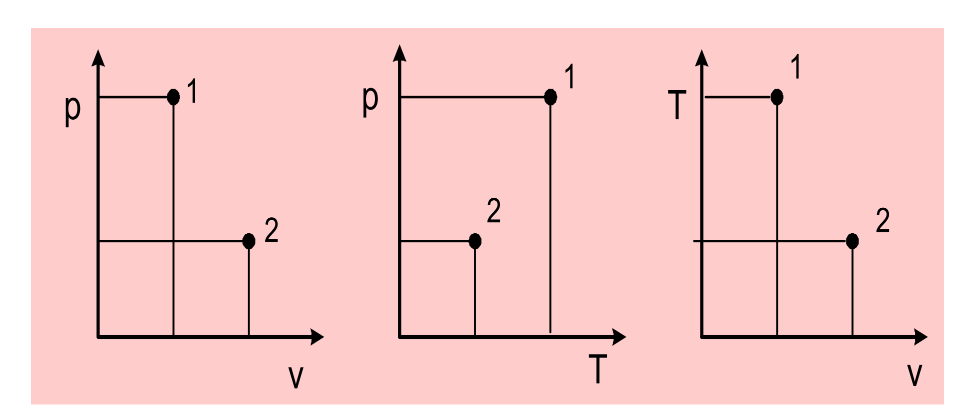


شكل (٤- ٦) منحنى تغير درجة الحرارة مع الحجم النوعي

حالة مائع التشغيل The State Of The Working Fluid

عند دراسة الديناميكا الحرارية التطبيقية نهتم دائما بالطاقة المنتقلة من وإلى النظام. وتعرف المادة الموجودة داخل النظام عندما تكون على هيئة غاز أو بخار أوسائل بمائع الشغل أو المائع تحت الدراسة working fluid . وتعرف حالة مائع الشغل في لحظة ما بخواص ذلك المائع. ومن الخواص التي يجب الاهتمام بها في دراسة الديناميكا الحرارية في هذه المرحلة هي الضغط، درجة الحرارة، الحجم النوعي، الطاقة الداخلية، الإنثالبي والإنتروبي. ولقد وجد أنه في حالة مائع التشغيل النقي (pure working fluid) يمكن تحديد حالة المائع تماما بمعرفة أي خاصيتين مستقلتين كما أسلفنا. عليه يمكن تمثيل حالة النظام بنقطة على منحنى الخواص. فمثلا الأسطوانة التي تحتوي على مائع ضغطه p_1 وحجمه النوعي v_1 يمكن تمثيلها بالحالة (1) كما هو موضح على منحنى الضغط والحجم النوعي، شكل (٤- ٧) . وحيث إن الحالة قد حددت تماماً لذا تحديد درجة حرارة النظام T_1 وعليه يمكن تمثيل حالة النظام بنقطة على منحنى الضغط ودرجة الحرارة أو درجة الحرارة والحجم النوعي، شكل (٤- ٧). أما إذا تحرك المكبس داخل الأسطوانة فإن مائع الشغل سوف تتغير حالته (1) إلى الحالة (2) . ويمكن تمثيل هذه الحالة بالنقطة (2) على المنحنيات التي ذكرت سابقا. وهكذا فإن منحنيات الخواص تستخدم باستمرار

لتسجيل تغير حالة النظام من حالة إلى أخرى. ومن أهم هذه المنحنيات الحجم النوعي- درجة الحرارة، ودرجة الحرارة- الإنتروبي، ومنحنى الضغط- الإنثالبي والذي نستخدمه كثيرا في مجال التبريد.



شكل (٤ ـ ٧) تمثيل حالة المادة الشغالة على منحنى الخواص

كما ذكرنا فإن المادة الشغالة يمكن أن تكون على هيئة سائل أو غاز ويمكن أيضا أن تكون مادة مثالية أو مادة حقيقية. المادة المثالية هي عبارة عن المادة التي تنعدم قوى الترابط بينها مثل الغازات المثالية وتتبع القانون العام للغازات. أما المادة الحقيقية فهي المادة التي لجزيئاتها أبعاد وقوى تجاذب ويمكن تجميدها وإسالتها وتبخيرها ولا تتبع القانون العام للغازات مثل الماء والفريونات والأمونيا.

القانون العام للغازات المثالية:

تعرف العلاقة التي تربط بين خواص مادة ما بمعادلة الحالة equation of state الخاصة بتلك المادة. فإذا عرفت قيم أي خاصيتين فإن قيم الخواص الأخرى يمكن إيجادها من معادلة الحالة. وفي حالة الغاز المثالي تكون معادلة الحالة التي يربط بين الضغط والحجم النوعي ودرجة الحرارة كالتالي:

$$p\times v=R\times T \qquad (4-1)$$

أو

$$p = \rho\times R\times T \qquad (4-2)$$

أو

$$p\times V=m\times R\times T \qquad (4-3)$$

وهي كلها صيغ مختلفة لمعادلة الغاز المثالي وفيها تعرف الخواص كالتالي:

p	هو الضغط المطلق	N/m^2
V	هي الحجم الكلي للغاز	m^3
v	هو الحجم النوعي للغاز	m^3/kg

m هي كتلة الغاز kg

T هي درجة الحرارة المطلقة للغاز K

R ثابت الغازات J/kg K

ρ هي كثافة الغاز kg/m^3

مثال:

هواء عند درجة حرارة $25\ ^oC$ وضغط قدره 101.325 kPa. أوجد الحجم النوعي للهواء عند هذه الحالة إذا علم أن ثابت الغازات للهواء يساوي R=287 J/kg K.

الحل:

باستخدام القانون العام للغازات:

$$p \times v = R \times T$$

$$(101.325 \times 1000) \times v = 287 \times (25 + 273)$$

$$\therefore v = \frac{287 \times 298}{101.325 \times 1000} = 0.884\ m^3/kg$$

ثابت الغازات J/kg ^oK	الغاز
287	الهواء
188.9	ثاني أكسيد الكربون
296.4	الإثيلين
4124	الهيدروجين
296.8	النتروجين
259.8	الأوكسجين
461.5	البخار

جدول(٤- ١) ثابت الغازات لبعض الغازات الشائعة

مثال:

أسطوانة معدنية شكل (٤- ٨)، سعتها 30 لتر ملئت بالأوكسجين تحت ضغط 100 bar ودرجة حرارة 17 C˚ . استعمل جزء من الأوكسجين في عمليات اللحام في ورش التبريد فانخفض الضغط إلى 75 bar ودرجة الحرارة إلى C˚ 7. احسب كتلة الأوكسجين التي استخدمت. خذ ثابت الغازات للأوكسجين 260 J/kg K.

الحل:

نستخدم القانون العام للغازات:

$$p \times V \quad = m \times R \times T$$

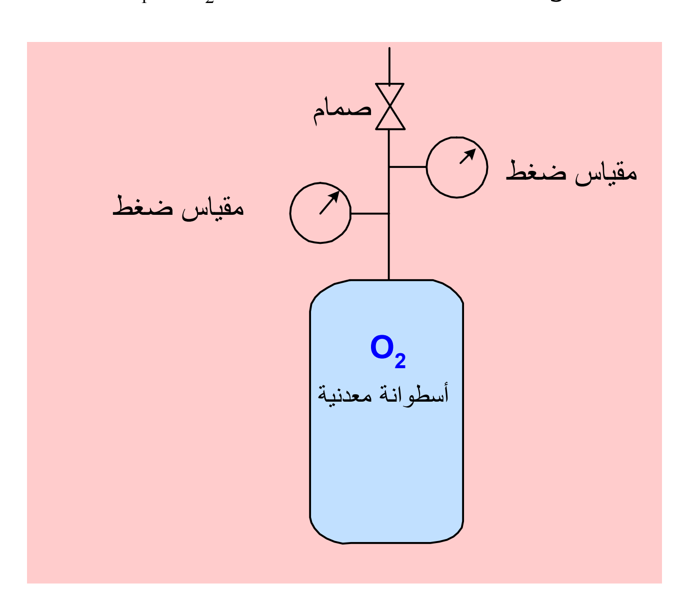
نحسب كتلة الأكسجين في البداية m_1، ثم نحسب كتلة الأكسجين بعد الاستعمال m_2 ومن ثم نحصل على كمية الأكسجين المستعملة بالطرح.

$$\therefore m_1 \quad = \frac{p_1 \times V}{R \times T_1} \quad = \frac{(100 \times 10^5)(30 \times 10^{-3})}{260 \times (17 + 273)} \quad = 3.98\ kg$$

$$\therefore m_2 \quad = \frac{p_2 \times V}{R \times T_2} \quad = \frac{(75 \times 10^5)(30 \times 10^{-3})}{260 \times (7 + 273)} \quad = 3.09\ kg$$

إذن كمية الأكسجين التي استخدمت

$$m_1 - m_2 \quad = 3.98 - 3.09 \quad = 0.89\ kg$$



شكل (٤- ٨): المثال

الحرارة النوعية: specific heat

الحرارة النوعية هي كمية الحرارة التي تتبادلها المادة الشغالة للنظام مع الوسط المحيط بها عندما تتغير درجة حرارة وحدة الكتلة للمادة الشغالة درجة واحدة. هناك نوعان من الحرارة النوعية للغازات، الحرارة النوعية عند ضغط ثابت c_p والحرارة النوعية عند حجم ثابت c_v. وتعتبر الحرارة النوعية للغازات المثالية ثابتة للغاز المعين عند مختلف درجات الحرارة والضغوط. أما الغازات الحقيقية فتختلف حرارتها النوعية بتغير الضغط ودرجة الحرارة. ويبين الجدول (٤- ١) الحرارة النوعية لبعض المواد.

المادة	C_p kJ/kg K	المادة	C_p kJ/kg K
الألمنيوم	0.9	الحديد	0.45
النحاس	0.386	الخرسانة	0.65
الزجاج	0.8	الهواء	1.0
الماء	4.187	الثلج	2.1

جدول (٤- ٢) الحرارة النوعية لبعض المواد عند $25\ ^oC$

ويمثل الفرق بين الحرارة النوعية بثبوت الضغط والحرارة النوعية بثبوت الحجم ثابت الغاز R والنسبة بينهما تعرف بنسبة الحرارة النوعية ويرمز لها بالرمز k وهو أيضا ثابت لكل غاز وقيمته دائما أكبر من واحد وذلك لأن قيمة c_p دائما أكبر من قيمة c_v.

الطاقة Energy

يبدو مفهوم الطاقة معروفاً لكثير من الناس ولكن هناك صعوبة في تعريف الطاقة بصورة دقيقة. فهي كمية قياسية يمكن تقديرها بواسطة إجراء قياسات بعينها. هناك عدة مصادر للطاقة منها ما هو معروف ومنها ما لم يتم اكتشافه بعد. ولكن عند معرفة مصدر طاقة بعينها لابد من وجود طريقة لتحويلها لصورة تخدم حاجة الإنسان. وتعتبر الشمس مصدر الطاقة الرئيسي للأرض فهي تبعث طيفاً من الطاقة عبر الفضاء و الغلاف الجوي بالإشعاع الكهرومغناطيسي. والطاقة موجودة في تكوين المادة ويمكن تحريرها بواسطة تفاعلات كيميائية وذرية. فالطاقة الكيميائية الموجودة في أنواع الوقود المختلفة (زيت، فحم، غاز) يمكن حرقها والحصول منها على حرارة يمكن الاستفادة منها في إنتاج الطاقة الميكانيكية التي تدير التوربينات والمحركات وغيرها. وعبر التاريخ تميز بزوغ الحضارات المادية باكتشاف الإنسان للطاقة واستغلالها في كافة نواحي الحياة.

وتعرف الطاقة بأنها السعة التي يمتلكها الجسم أو النظام لأداء شغل. والشغل كما هو معروف ميكانيكيا هو نتيجة حركة قوة ما مسافة معينة.

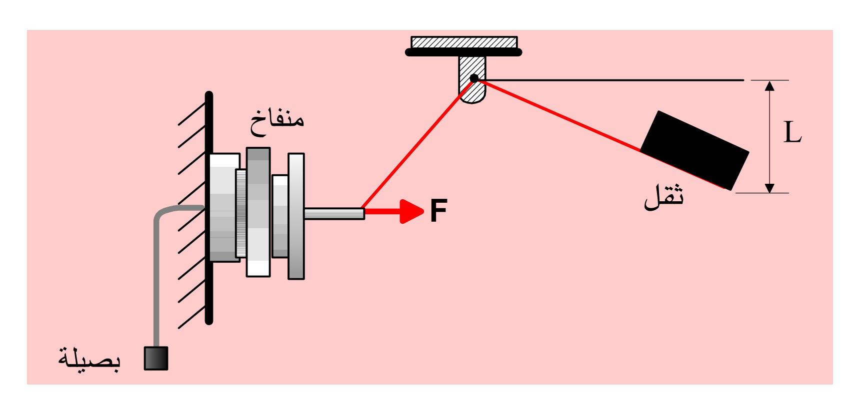
الحرارة heat

تعرف الحرارة بأنها الطاقة المنتقلة عبر حدود النظام كنتيجة لفرق درجات الحرارة بين النظام والبيئة المحيطة به، وتنتقل الحرارة من الأجسام الساخنة إلى الأجسام الباردة. ولا يمكن للأجسام أن تحوي حرارة ولكنها تمتلك طاقة فقط. إذا أخذنا مثلا قطعة من النحاس الساخن كنظام وإناء به ماء بارد كنظام آخر. فبداية نحن نعلم أن أياً من النظامين لا يحتوي على حرارة. ولكن عندما نضع قطعة النحاس داخل الماء فإن الحرارة تنتقل من قطعة النحاس الساخنة إلى الماء البارد إلى أن يحدث اتزان في درجات الحرارة بين النظامين. عند هذه النقطة لا يحدث انتقال في الحرارة لأنه لا يوجد فرق في درجات الحرارة..ولقد جرى العرف أن الحرارة المضافة لنظام ما تكون موجبة والحرارة المزالة أو المطرودة من نظام ما تكون سالبة.

الشغل work

يحدث الشغل عندما تكون هناك قوة تتسبب في تحريك أو تغيير وضع جسم ما. الشغل الميكانيكي يحدث عندما تتسبب قوة أو عزم في تحريك جسم ما مسافة معينة. وهو حاصل ضرب القوة في المسافة التي يتحركها الجسم في اتجاه القوة. والشغل المفيد يأخذ عدة أشكال مثل تحريك قضيب من الحديد من مكان إلى آخر، أو تحريك عمود المرفق في السيارة أو تحريك الماء البارد في الأنابيب في عمليات تكييف الهواء بواسطة المضخات وتحريك الشحنة الكهربائية خلال الكيبل الكهربي. ولابد للشغل أن يتسبب في إحداث تغيير ما في كل الأحوال. هذا التغيير يمكن أن يكون واضحا تماما كرفع أطنان من الحديد أو غير واضح تماما كتحريك شحنة صغيرة في ذاكرة حاسب آلي. وعندما تتحرك حدود النظام المغلق في اتجاه القوة التي تعمل عليها فإن الوسط المحيط يعمل شغلا على النظام ويعتبر شغلاً موجباً، أما إذا تحركت الحدود إلى الخارج فنقول أن النظام هو الذي عمل شغلا على الوسط المحيط ويعتبر شغلاً سالباً. ومن تعريفات الشغل أيضا أنه الطاقة التي تخترق حدود المنظومة نتيجة لأي قوة أخرى غير فرق درجات الحرارة ويمكن أن يحلل الشغل دائما إلى فعل مكافئ لقوة معينة تتحرك خلال مسافة معينة.

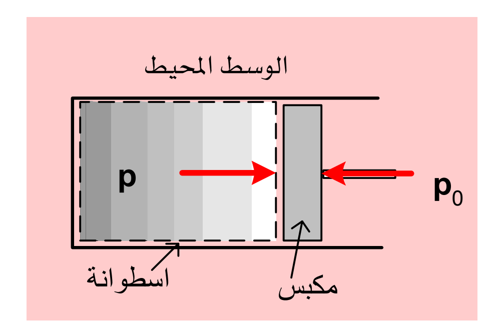
ففي الشكل (٤- ٩) تتمدد المادة الشغالة في البصيلة نتيجة لارتفاع درجة حرارتها فتدفع مكبس المنفاخ (النظام في هذه الحالة) الذي يدفع مجموعة الأذرع فتؤدي إلى رفع الثقل مسافة محددة، L.



شكل (٤ ـ ٩) الشغل الميكانيكي

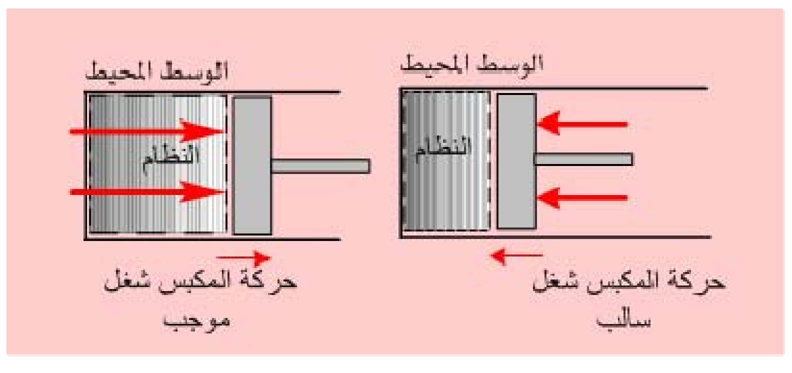
الشغل الثيرموديناميكي:

لنفرض أن ضغط المادة الشغالة في منظومة الأسطوانة والمكبس الموضحة بشكل (٤- ١٠) هو p وضغط الوسط الذي حول المنظومة هو p_0. إذا كان p أكبر من p_0 يمكن القول أن المنظومة ليست في حالة اتزان مع الوسط المحيط بها وعليه فإن المادة الشغالة تتمدد وتؤدي إلى شغل موجب يرمز له بـ w_{out}



شكل (٤ ـ ١٠) الشغل الثيرموديناميكي

وإذا كانت p أصغر من p_0 فإن المادة الشغالة ستنضغط وينتج عن ذلك شغل سالب يرمز له بـ w_{in}. انظر الشكلين التاليين (٤- ١١ - أ و ٤- ١١ - ب).



شكل (٤ ـ ١١ ـ أ) شكل (٤ ـ ١١ ـ ب)

طرق الشغل المختلفة:

هناك عدة طرق لأداء الشغل منها شغل الإزاحة displacement work والشغل الكهربي electric work وشغل العمود shaft work.

شغل الإزاحة: Displacement Work

يعتبر تمدد أو انكماش الغاز في منظومة المكبس والأسطوانة شغل إزاحة. ويعبر عن ذلك رياضياً:

$$dW = F \times dl \qquad (4-4)$$

حيث dl هي المسافة التي يقطعها جسم معين نتيجة تأثير قوة F وdW هي الشغل المبذول. ولكن

$$F = p \times A$$

حيث p هو الضغط وA هي المساحة.

بالتعويض عن F بدلالة p في المعادلة (4-4) ينتج الآتي:

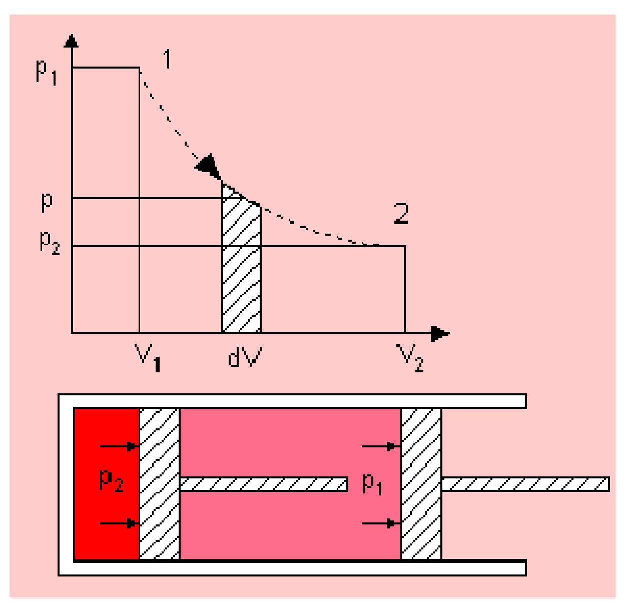
$$dW = p \times A \times dl$$

وبالتعويض عن حاصل ضرب dl×A بالتغير في الحجم dV نصل إلى معادلة الشغل خلال إزاحة صغيرة dV:

$$dW = pdV$$

ومن ثم يكون الشغل خلال الإجراء 1-2، شكل (٤- ١٢) هو:

$$W = \int_1^2 pdV \qquad (4-5)$$



شكل (٤- ١٢) شغل الإزاحة

إذا عرفت العلاقة بين الحجم والضغط فإنه يمكن تعيين الشغل. أي أن الشغل دالة مسار. ويمكن تمثيل شغل تغير الحجم بالمساحة تحت المنحنى في خريطة الضغط- الحجم.

هناك تشابه بين الحرارة والشغل ويظهر هذا التشابه في النقاط التالية:

- الحرارة والشغل طاقتان عابرتان. النظام لا يمتلك شغلا أو حرارة ولكنهما يعبران حدود النظام عندما يغير النظام من حالته.
- الحرارة والشغل هي طاقات حدودية.

أنواع الشغل المختلفة لكل الإجراءات:

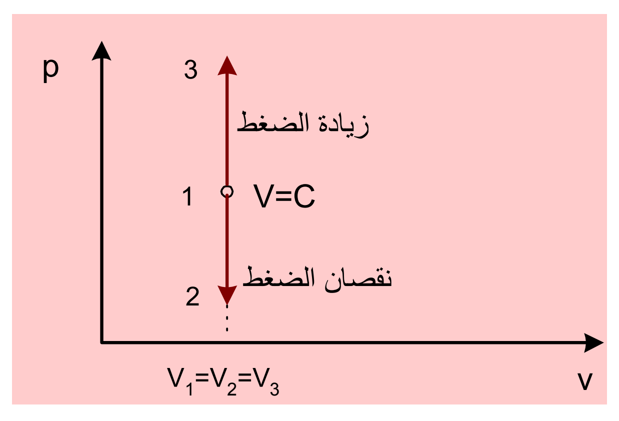
١. إجراء ثبوت الحجم: **constant volume process**

هذه العملية يعبر عنها بالمعادلة

$$V = C$$

حيث C ثابت.

وتمثل هذه العملية على منحنى الضغط والحجم كما هو واضح من الشكل (٤- ١٣)



شكل (٤ ـ ١٣) العملية ذات الحجم الثابت

وحيث إن التغير في الحجم dV يساوي صفراً فإن الشغل الناتج من هذه العملية يساوي صفرا.

$$W = \int_1^2 p dV = 0 \qquad (4-6)$$

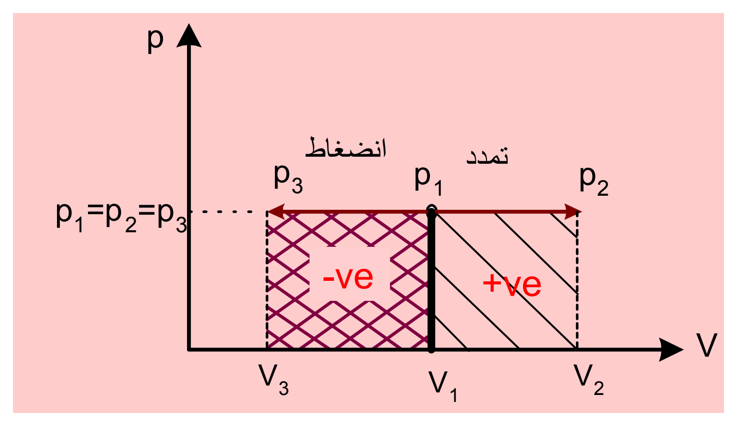
٢. إجراء ثبوت الضغط: **constant pressure process**

الضغط ثابت خلال هذا الإجراء، أي أن:

$$p = C \qquad (4-7)$$

حيث C تساوي ثابت.

وتمثل هذه العملية على منحنى الضغط والحجم كما هو واضح من الشكل (٤- ١٤)



شكل (٤- ١٤) يوضح الإجراء ذا الضغط الثابت

في هذا الإجراء يتغير الحجم في حالة التمدد من V_1 إلى V_2 أو من V_1 إلى V_3 في حالة الانضغاط.

ويحسب الشغل في حالة التمدد كالتالي:

في حالة التمدد:

$$w_{12} = \int_{v_1}^{v_2} p\, dV = p \times (V_2 - V_2) = +ve\ work \qquad (4-8)$$

أما في حالة الانضغاط:

$$w_{13} = \int_{v_1}^{v_3} p\, dV = p \times (V_3 - V_1) = -ve\ work$$

ويلاحظ أن المساحة تحت منحنى الإجراء تمثل الشغل المبذول بواسطة ذلك الإجراء.

مثال:

غاز حجمه $0.2\ m^3$ وضغطه $2\ bar$ يتمدد عند ضغط ثابت حتى يصل حجمه إلى $0.5\ m^3$، احسب الشغل الناتج من هذا الإجراء.

الحل

حيث إن الضغط ثابت خلال هذا الإجراء، لذا يكون الشغل كالتالي:

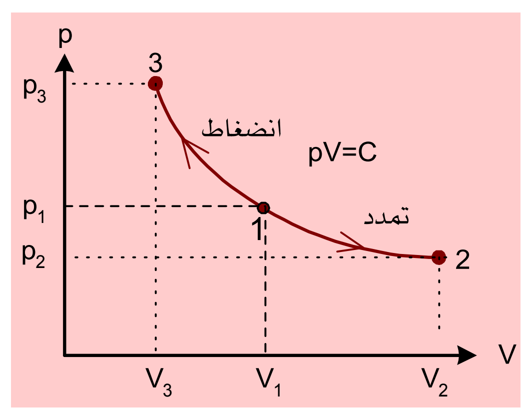
$$W = \int_1^2 pdV = p(V_2 - V_1) = 2\times10^5 (0.5 - 0.2) = 6\times10^4\ J$$

٣. إجراء ثبوت درجة الحرارة :isothermal process

تبقى درجة الحرارة ثابتة خلال هذا الإجراء ويتغير كل من الضغط والحجم تبعاً للعلاقة:

$$pV = C \qquad (4-9)$$

حيث C تساوي ثابت.



شكل (٤ ـ ١٥) إجراء ذو درجة حرارة ثابتة

وتبدو هذه العملية على منحنى الضغط والحجم كما هو مبين بالشكل (٤- ١٥). الإجراء 2-1 هو إجراء تمدد أما الإجراء 3-1 فإنه إجراء انضغاط. يمكن حساب الشغل الناتج كالتالي:

$$w = \int_{V_1}^{V_2} pdV$$

ولكن من معادلة الغازات المثالية

$$p = \frac{mRT}{V}$$

إذن بالتعويض في معادلة الشغل عن قيمة الضغط ينتج الآتي:

$$W = mRT \int_{V_1}^{V_2} \frac{dV}{V} = mRT \left[ln V\right]_{V_1}^{V_2}$$

$$W = mRT \; ln \frac{V_2}{V_1} \qquad (4-10)$$

وكما ذكرنا سابقا فإن المساحة تحت منحنى الإجراء تمثل الشغل المبذول بواسطة ذلك الإجراء.

مثال

هواء حجمه $0.2\ m^3$ وضغطه 1 bar ودرجة حرارته $27\ ^oC$ يتمدد بثبوت درجة الحرارة حتى يصل حجمه $0.4\ m^3$ ، احسب الشغل الناتج من هذا الإجراء.

الحل

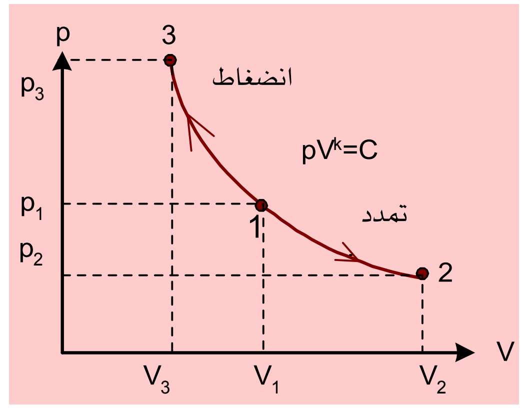
حيث إن الإجراء يتم بثبوت درجة الحرارة، إذن يكون الشغل كالتالي:

$$W = mRT\ ln\frac{V_2}{V_1}$$

ومن القانون العام للغازات لحالة الغاز الأولى

$$p_1V_1 = mRT$$

$$\therefore W = p_1V_1\ ln\frac{V_2}{V_1} = 1\times 10^5\ ln\frac{0.4}{0.2} = 69314.7\ J$$



شكل (٤- ١٦) الإجراء الأدياباتي

٤. الإجراء الأدياباتيكي: adiabatic process

يتم هذا الإجراء في عملية معزولة تماما وبالتالي لا يوجد انتقال حرارة بين النظام والبيئة المحيطة به. إذا تمدد النظام خلال هذه العملية فإنه يعمل شغلاً وبالتالي فلابد من طاقة لعمل ذلك الشغل. ولما كانت العملية أدياباتيكية فإنه ليس هناك حرارة منتقلة من وإلى النظام وبالتالي فإن النظام مضطر لعمل الشغل من طاقته الداخلية مما يؤدي إلى خفض في درجة حرارة النظام. أما في حالة الانضغاط الأدياباتيكي فإن الوسط المحيط هو الذي يعمل شغلا على النظام وبالتالي فإن طاقة النظام سوف تزيد بمقدار الشغل الذي عمل عليه وبالتالي ترتفع درجة حرارته. يمكن أن يعبر عن هذا الإجراء كالتالي:

$$pV^k \quad = C$$

حيث k هي نسبة الحرارة النوعية. وتبدو هذه العملية على منحنى الضغط والحجم كما هو واضح من الشكل (٤- ١٦)، .ويمكن حساب الشغل كالتالي:

$$w = \int_{V_1}^{V_2} pdV = C\int \frac{dV}{V^k} = C\left[\frac{V^{-k+1}}{-k+1}\right]_{V_1}^{V_2} = \frac{C\left[V_2^{1-k} - V_1^{1-k}\right]}{-k+1}$$

وبالتعويض عن قيمة الثابت C بـ $(p_1v^k_1)$ أو $(p_2v^k_2)$ نصل إلى الصورة النهائية لشغل الإجراء الأديباتي:

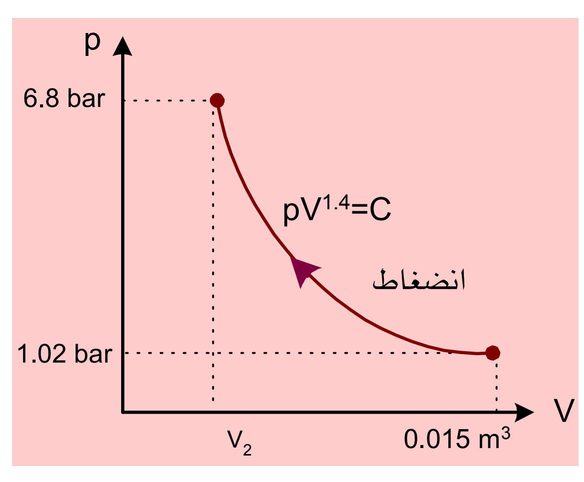
$$W = \frac{p_1V_1 - p_2V_2}{k-1} \qquad (4-11)$$

وكما ذكرنا سابقا فإن المساحة تحت منحنى الإجراء تمثل الشغل المبذول بواسطة ذلك الإجراء.

مثال:

هواء عند درجة حرارة 22 ^{o}C وضغط 1.02 bar يشغل $0.015m^3$ من حجم الأسطوانة في البداية. إذا ضغط هذا الهواء خلال عملية انعكاسية وأدياباتيكية بواسطة مكبس إلى ضغط قدره 6.8bar **احسب الحجم** في نهاية مشوار الانضغاط والشغل المعمول على الهواء. اتخذ k للهواء 1.4.

الحل:



الشكل (٤ ـ ١٧) مثال

العملية ادياباتيكية، إذن

$$pV^k \quad = C$$

أو بمعنى أن

$$p_1V_1^k \quad = p_2V_2^k$$

$$\frac{V_2}{V_1} = \left(\frac{p_1}{p_2}\right)^{1/k}$$

$$\frac{V_2}{0.015} = \left(\frac{1.02}{6.8}\right)^{1/1.4}$$

$$V_2 = 0.00387\ m^3$$

لحساب الشغل W_{12}

$$w_{12} = \frac{p_1V_1 - p_2V_2}{k-1}$$

$$w_{12} = \frac{10^5(1.02\times 0.015 - 6.8\times 0.00387)}{1.4-1} = -2754\ J = -2.754\ kJ$$

وتشير الإشارة السالبة إلى أن الشغل شغل انضغاط.

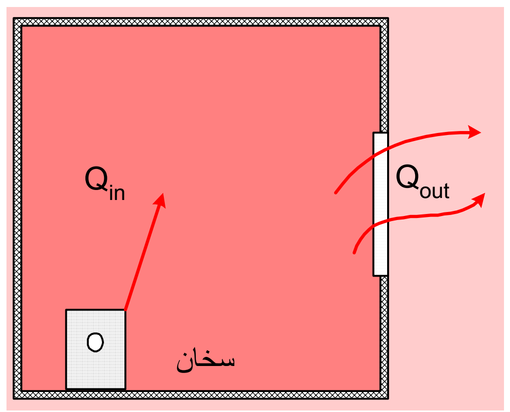
الفصل الثاني

القانون الأول للديناميكا الحرارية

First law of thermodynamic

مقدمة

يربط القانون الأول للديناميكا الحرارية بين الطاقات المختلفة وهو تعبير خاص عن قاعدة بقاء الطاقة أي أن الطاقة لا تفنى ولا تستحدث ولكن يمكن تحويلها من شكل إلى آخر. يستفاد كثيرا من القانون الأول للديناميكا الحرارية في تطبيقات التدفئة والتهوية وتكييف الهواء خاصة عند الحديث عنه كاتزان في الطاقة " الطاقة المضافة للنظام مطروحاً منها الطاقة المطرودة من النظام تساوي التغير في طاقة النظام".مثلا تتم تدفئة غرفة في منزل ما (شكل ٤- ١٨) بواسطة سخان زيت يعطي معدل حرارة 1.17 kW (Q_{in}) فإذا كان معدل الحرارة المنتقلة إلى خارج الغرفة (Q_{out}) 1.9 kW. ماذا يحدث داخل الغرفة؟



شكل (٤ ـ ١٨) مثال التدفئة بواسطة السخان

بتطبيق القانون الأول للديناميكا الحرارية بصيغة اتزان الطاقة نجد أن:

الطاقة المضافة للغرفة مطروحا منها الطاقة المطرودة من الغرفة تساوي التغير في طاقة الغرفة،

وبالتالي:

$$1.17 - 1.9 = -0.73 \text{ kW}$$

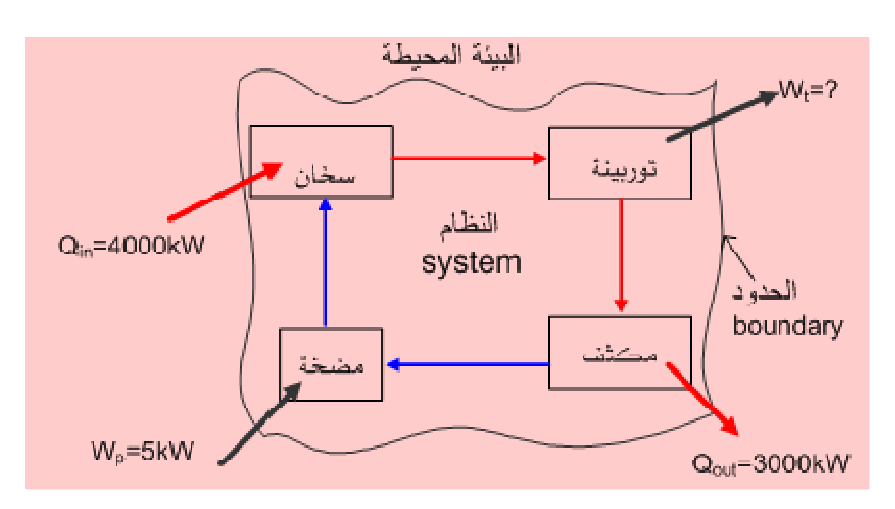
واضح أن التغير السلبي في طاقة الغرفة سيجعل درجة حرارة الغرفة تنخفض وبالتالي ولمعالجة هذا الوضع لابد من إضافة سخان آخر ليضيف كمية حرارة إضافية قدرها حوالي 730W.

وفي حالة تطبيق القانون الأول للديناميكا الحرارية لدورة كاملة فإن محصلة الحرارة المتبادلة مع النظام تساوي محصلة الشغل المستفاد من النظام. ويعبر عن ذلك بالعلاقة الرياضية التالية:

$$\sum Q = \sum W \qquad (4-12)$$

مثال(٤ ـ ٧):

احسب الشغل المستفاد (W_t) من منظومة البخار التالية شكل (٤- ١٧)



شكل(٤ ـ ١٩) المثال

الحل:

بتطبيق القانون الأول للديناميكا الحرارية:

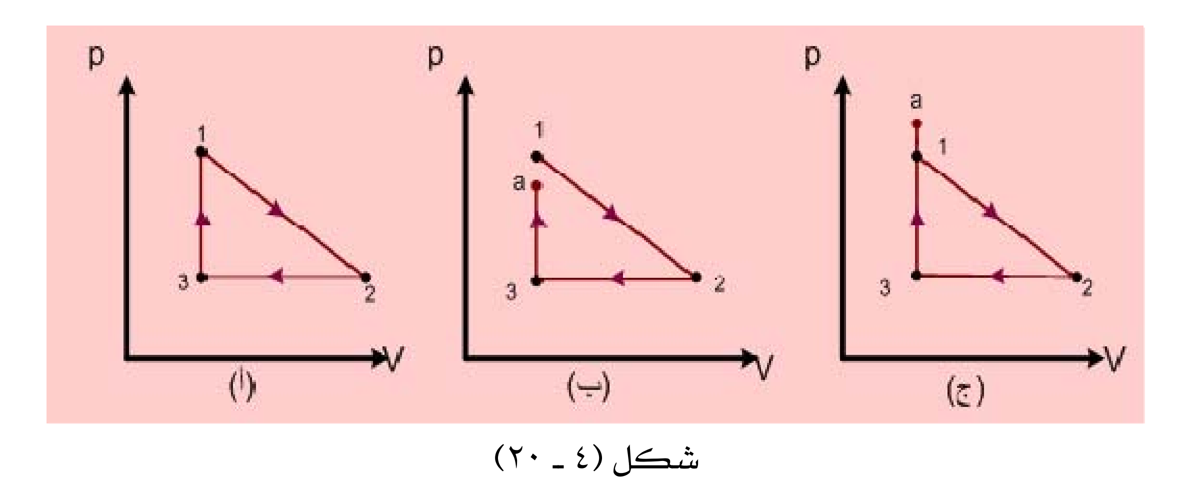
$$\sum Q = \sum W$$

$$4000 - 3000 = W_t - 5$$

$$\therefore W_t = 1000 + 5$$

$$W_t = 1005\ kW$$

تطبيق القانون الأول للديناميكا الحرارية على نظام مغلق First Law for a Closed System:



شكل (٤ ـ ٢٠)

لقد ذكرنا في الصيغة السابقة للقانون الأول للديناميكا الحرارية أنه إذا خضع أي نظام ثيرموديناميكي لدورة كاملة فإن محصلة الحرارة المتبادلة للنظام تساوي محصلة شغل النظام ، وهذا ما توضحه الدورة في الشكل (٤ - ٢٠ ـ أ) وهو يعني أن الطاقة الذاتية الابتدائية للنظام تساوي الطاقة الذاتية النهائية له. ولكن عندما تكون الطاقة الذاتية للنظام في نهاية مجموعة من الإجراءات أكبر من الطاقة الذاتية للنظام في بدايتها (شكل ٤ – ٢٠ ـ ج) ففي هذه الحالة فإن محصلة الحرارة أكبر من محصلة شغل النظام وبالتالي هناك كسب في الطاقة الذاتية للنظام gain in intrinsic energy.

وعندما تكون محصلة الحرارة أقل من محصلة شغل النظام يكون هناك فقد في الطاقة الذاتية للنظام (٤ – ٢٠ ـ ب) loss in intrinsic energy.

وبالتالي يأخذ القانون الأول للديناميكا الحرارية الصورة العامة التالية

محصلة الحرارة –محصلة الشغل= التغير في الطاقة الذاتية للنظام

عندما يكون النظام أو المادة الشغالة في حالة سكون أي نظاما مغلقا (طاقة الحركة والوضع مهملين) فإن الطاقة الذاتية للنظام تؤول إلى الطاقة الداخلية فقط internal energy ويرمز لها بالرمز u في حالة الطاقة الداخلية النوعية و U في حالة الطاقة الداخلية الكلية (J, kJ). الطاقة الداخلية للنظام تعتمد على ضغط و درجة حرارة النظام ونوع المادة. وهي خاصية من خواص النظام مثلها مثل درجة الحرارة والضغط والكثافة. وبالتالي يأخذ القانون الأول للديناميكا الحرارية للنظم المغلق الصورة التالية

$$q - w = \Delta u \qquad (4-13)$$

حيث Δu هي التغير في الطاقة الداخلية النوعية خلال إجراء معين.

ويمكن حساب التغير في الطاقة الداخلية للنظام بمعلومية التغير في درجة الحرارة كما يلي

$$\Delta u = c_v \times \Delta T$$

حيث c_v هي الحرارة النوعية بثبوت الحجم.

وخير مثال لهذا النظام والذي كثيراً ما عولج كنظام مغلق في معظم المراجع في الديناميكا الحرارية هو نظام الأسطوانة والمكبس سواء كان في الضواغط الترددية أو في ماكينات السيارات أو غيرها.

يمكن لهذا النظام أن تكون له حرارة مفقودة أو مضافة، أيضا يمكن أن يكون هناك شغل معمول بواسطة المنظومة على البيئة أو البيئة على النظام. ويتميز هذا النظام بعدم تبادل الكتلة مع البيئة المحيطة.

مثال1:

احسب التغير في الطاقة الداخلية لمائع التبريد في ضاغط ترددي إذا كانت الحرارة المفقودة منه 45 kJ/kg والشغل المبذول عليه $90 kJ/kg$. وضح ما إذا كان هناك كسب أم فقدان في الطاقة الداخلية لمائع التبريد في الضاغط.

الحل:

$$q = -45 kJ/kg$$

$$w = -90 kJ/kg$$

بتطبيق القانون الأول للديناميكا الحرارية

$$q - w = \Delta u$$

$$-45 - (-90) = u_2 - u_1$$

$$u_2 - u_1 = 45\ kJ/kg$$

يتضح أن التغير في الطاقة الداخلية موجب و بالتالي فهو كسب في الطاقة الداخلية.

مثال :

احسب الحرارة المفقودة أو المكتسبة من أسطوانة ضاغط هواء إذا كان الهواء المضغوط له طاقة داخلية قدرها 420kJ/kg في بداية شوط التمدد و طاقة داخلية قدرها 200kJ/kg في نهاية شوط التمدد ، وكان الشغل المبذول بواسطة مكبس الضاغط على البيئة أثناء شوط التمدد 100kJ/kg .

الحل:

$$q - w = \Delta u$$

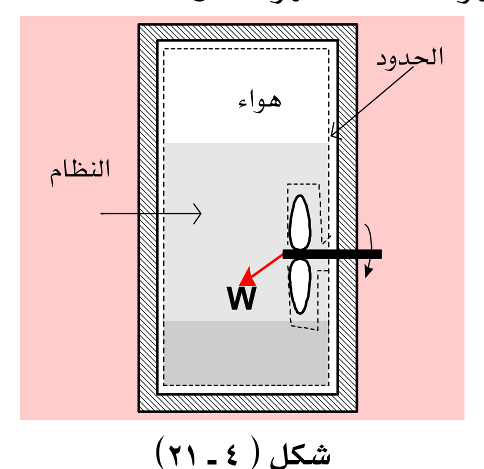
$$q - 100 = (200 - 420)$$

$$q = -120 kJ / kg$$

إذاً الحرارة المفقودة من الأسطوانة تساوي $120 kJ / kg$

مثال:

يحتوي خزان معزول (شكل (٤- ١٩) على 0.2 kg من الهواء عند درجة حرارة 300 K وضغط 100 kPa. تدور بداخل الخزان عجلة ذات ريش paddle wheel فتنقل طاقة قدرها 5 kJ للهواء. احسب التغير في الطاقة الداخلية ودرجة الحرارة النهائية للهواء. (خذ c_v للهواء 0.7165 kJ/kg K)



شكل (٤ ـ ٢١)

الحل:

بالرجوع للشكل (٤- ٢١) وبتطبيق القانون الأول للنظام المغلق:

$$Q - W = \Delta U$$

الخزان معزول عليه فإنه لا يوجد انتقال حرارة من وإلى النظام. وبالتالي فإن $Q = 0$

$$- W = \Delta U$$

$$\therefore -(-5\ kJ) = \Delta U$$

إذن التغير في الطاقة الداخلية هو 5 kJ.

بمعنى أن:

$$\Delta U = +5$$

أي أن U_2 أكبر من U_1 وبالتالي فإن هناك كسب في الطاقة الداخلية.

لحساب درجة الحرارة

$$\Delta U = mc_v(T_2 - T_1)$$

$$5 = 0.2 \times 0.7165 \times (T_2 - 300)$$

$$\therefore T_2 = 334.89\ K = 61.89\ °C$$

مثال(٤ ـ ٩)

يسخن 1.2kg من الماء في غلاية شاي بواسطة سخان كهربي قدرته 1200 W من 15 ˚C إلى 95 ˚C. إذا كانت كتلة غلاية الشاي 0.5kg وحرارته النوعية 0.7 kJ/kg ˚C والحرارة النوعية للماء 4.18 kJ/kg ˚C، ما هي مدة عمل السخان الكهربي حتى يتم تسخين الماء. (أهمل الحرارة التي تفقدها الغلاية أثناء التسخين). قارن إجابتك بحساب التغير في الطاقة الداخلية للماء فقط وإهمال التغير في الطاقة الداخلية للغلاية.

الحل:

بتطبيق القانون الأول للديناميكا الحرارية على النظام المغلق: (النظام في هذه الحالة هو الغلاية + الماء)

$$Q - W = \Delta U$$

لا يوجد في هذه الحالة شغل وبالتالي:

$$Q = \Delta U_{sys}$$

ولكن النظام هو الغلاية والماء.

$$\therefore Q = \Delta U_w + \Delta U_{teapot}$$

$$Q = (mc_v\Delta T)_w + (mc_v\Delta T)_{teapot}$$

$$Q = 1.2 \times 4.18 \times (95 - 15) + 0.5 \times 0.7 \times (95 - 15) = 429.3\ kJ$$

لعنصر التسخين الكهربي والذي قدرته 1.2 kW (أو 1.2 kJ/sec) فإنه و لإعطاء 429.3 kJ يحتاج لـ :

$$t = \frac{429.3\ kJ}{1.2\ kJ/sec} = 358\ sec \approx 6\ min$$

لو اعتبرنا أن النظام هو الماء فقط وأهملنا الحرارة المكتسبة بواسطة مادة الغلاية:

$$Q = \Delta U_{sys} = 1.2 \times 4.18 \times (95 - 15) = 401.28\ kJ$$

$$t = \frac{401.28\ kJ}{1.2\ kJ/sec} = 334.4\ sec = 5.57\ min$$

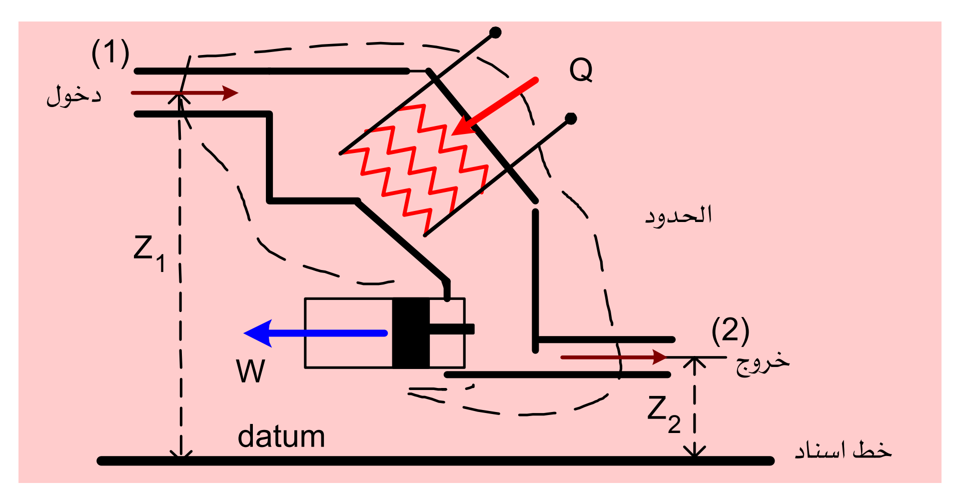
القانون الأول للديناميكا الحرارية للنظام المفتوح المستقر:

النظام المستقر هو النظام الذي لا تتغير أي من خواصه مع الزمن. ومن ثم فإن معدل سريان الكتلة ثابت.

كما ذكرنا أن القانون الأول للديناميكا الحرارية هو قانون بقاء الطاقة وعليه فإنه ولأي نظام ثيرموديناميكي مفتوح ومستقر فإن مجموع الطاقات الداخلة للنظام تساوي مجموع الطاقات الخارجة من النظام. ويوضح الشكل (٤- ٢٢) نظاماً ثيرموديناميكياً مفتوحاً ومستقراً. فلو تخيلنا أن هناك كيلوجراما واحدا في الثانية من مائع ما يدخل عند المقطع (1) ويخرج من المقطع (2). تمتلك هذه الكتلة من المائع عدة أنواع من الطاقة منها طاقة الوضع وطاقة الحركة وطاقة الضغط. يضاف لهذه الطاقات الطاقة الداخلية للمائع وما يضاف أو يطرد من طاقات أخرى كالحرارة والشغل للنظام.

الطاقات الداخلة للنظام:

- طاقة المائع الداخلية u_1.
- طاقة الحركة للمائع عند الدخول والناتجة من سرعته $\frac{c_1^2}{2}$
- طاقة الوضع للمائع عند الدخول والناتجة من ارتفاعه عن خط إسناد معين Z_1g.
- طاقة الضغط أو ما تسمى بطاقة السريان للمائع وهي p_1v_1. (v هو الحجم النوعي للمائع وp هو ضغط المائع)
- الطاقة الحرارية المضافة للنظام Q. (مفروض أنها داخلة للنظام ولكن يمكن أن تكون مطرودة).



شكل (٤ ـ ٢٢) السريان المستقر خلال نظام مفتوح

الطاقات الخارجة من النظام:

- طاقة المائع الداخلية u_2.
- طاقة الحركة للمائع عند الخروج والناتجة من سرعته $\frac{c_2^2}{2}$
- طاقة الوضع للمائع عند الخروج والناتجة من ارتفاعه عن خط إسناد معين Z_2g.
- طاقة الضغط أو ما تسمى بطاقة السريان للمائع وهي p_2v_2.(v هو الحجم النوعي للمائع و p هو ضغط المائع)
- الشغل W أيضا مفروض أنه شغل معمول بواسطة النظام على البيئة.

بتطبيق القانون الأول للديناميكا الحرارية على هذا النظام:

مجموع الطاقات الداخلة للنظام تساوي مجموع الطاقات الخارجة من النظام

$$\dot{m}\left(u_1 + \frac{c_1^2}{2} + z_1 g + p_1 v_1\right) + Q - W \quad = \dot{m}\left(u_2 + \frac{c_2^2}{2} + z_2 g + p_2 v_2\right) \qquad (4-14)$$

لابد من الإشارة هنا إلى أن مجموع الطاقة الداخلية وطاقة الضغط أو السريان هو ما يعرف بالانثالبي للمائع. وهناك تعريفات كثيرة ومعقدة للانثالبيا ولكنها لا تخدم غرضنا في التبريد والتكييف والتعريف الذي يخدمنا هنا هو أن الانثالبي هي المحتوى الحراري للمادة. أو هي الطاقة المخزونة نتيجة الضغط ودرجة الحرارة للمادة في حالة السريان. وبالتالي فإن:

$$h = u + pv \quad = \qquad (4-15)$$

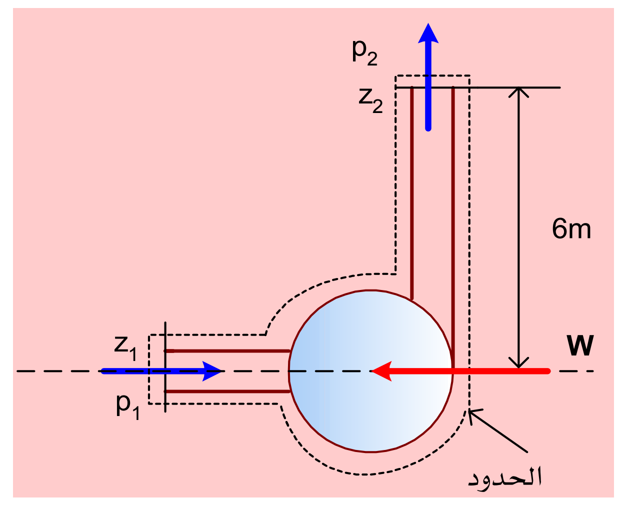
حيث h هي الانثالبي النوعية، وهي خاصية من خواص المادة

عليه فإن القانون الأول لنظام مفتوح ومستقر يمكن أن يكتب كالتالي:

$$\dot{m}\left(h_1 + \frac{c_1^2}{2} + z_1 g\right) + Q - W \quad = \dot{m}\left(h_2 + \frac{c_2^2}{2} + z_2 g\right) \qquad (4-16)$$

مثال

منظومة مضخة موضحة بالشكل (٤- ٢٠) ترفع ضغط الماء بمقدار 280kPa. إذا كان مخرج الماء من المضخة على ارتفاع 6m من مدخلها، احسب الشغل المطلوب لعمل هذه المضخة. تجاهل التغير في الطاقة الداخلية وطاقة الحركة للماء.(كثافة الماء تساوي $1000 kg/m^3$).



شكل (٤- ٢٣)

في هذا المثال لا توجد حرارة منتقلة من أو إلى النظام وبالتالي فإن Q تساوي صفراً.

أيضا فإن التغير في الطاقة الداخلية وطاقة الحركة مهملة. عليه يمكن تطبيق القانون الأول بين مدخل المضخة ومخرج المضخة كما في المعادلة (4-16)

$$\dot{m}\left(u_1 + \frac{c_1^2}{2} + z_1 g + p_1 v_1\right) + Q - W = \dot{m}\left(u_2 + \frac{c_2^2}{2} + z_2 g + p_2 v_2\right)$$

بافتراض أن كتلة سريان الماء كيلوجرام واحد في الثانية:

$$p_1 v_1 + z_1 g - w = p_2 v_2 + z_2 g$$

$$-w = p_2 v_2 - p_1 v_1 + z_2 g - z_1 g$$

وحيث إنه يمكن اعتبار أن كثافة الماء ثابتة

$$\therefore v_1 = v_2 = \frac{1}{\rho}$$

وبالتعويض عن الحجم النوعي بدلالة الكثافة

$$-w = \frac{p_2 - p_1}{\rho} + g(z_2 - z_1)$$

$$-w = \frac{280 \times 1000}{1000} + 9.81 \times 6$$

$$w = -338.86 \, {J}/{kg}$$

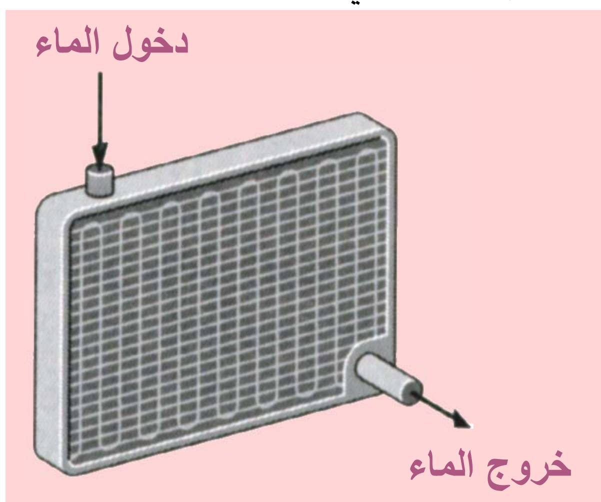
إشارة الشغل السالبة تدل على أن الشغل معمول بواسطة البيئة على النظام.

تطبيقات القانون الأول للديناميكا الحرارية:

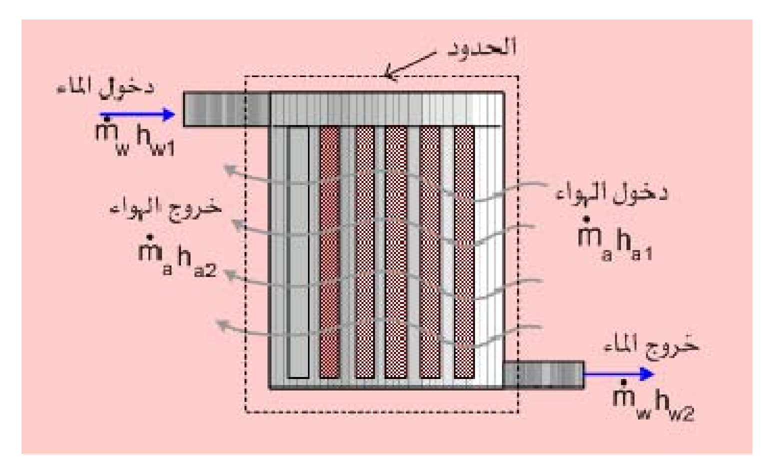
أولاً أنظمة حرارية فقط:

١. المبرد (الرادياتر): تنتقل الحرارة من المحرك إلى مياه التبريد في الرادياتر ومن ثم إلى الهواء كما في شكل (٤- ٢٤) و (٤- ٢٥).

يطبق القانون الأول على الماء وعلى الهواء كالتالي:



شكل (٤- ٢٤) رادياتير سيارة



الشكل (٤ ـ ٢٥) الرادياتر

بالنسبة للماء:

$$\dot{m}_w \left(h_{w1} + \frac{c_1^2}{2} + z_1 g \right) + Q_w - W = \dot{m}_w \left(h_{w2} + \frac{c_2^2}{2} + z_2 g \right)$$

وحيث إنه لا يوجد شغل ميكانيكي وبإهمال التغير في طاقة الحركة وطاقة الوضع يؤول القانون الأول إلى الصيغة التالية

$$Q_w = \dot{m}_w\,(h_{w2} - h_{w1})$$

وبالنسبة للهواء يمكن استنتاج أن:

$$Q_a = \dot{m}_a\,(h_{a2} - h_{a1})$$

حيث Q_w هي الحرارة المنتقلة من الماء إلى الهواء و Q_a هي الحرارة المكتسبة بالهواء من الماء

وحيث إن

$$Q_a = -Q_w$$

إذاً يؤول القانون الأول إلى

$$\dot{m}_w\,(h_{w2} - h_{w1}) = \dot{m}_a\,(h_{a1} - h_{a2})$$

المكثف و المبخر Condenser & Evaporator

في دورة التبريد البسيطة الموضحة في الشكل (٤ ـ٢٦) يمكن تطبيق القانون الأول للديناميكا الحرارية على المكثف و المبخر كنظامين حراريين.

القانون الأول للديناميكا الحرارية

$$\dot{m}\left(h_1 + \frac{c_1^2}{2} + z_1 g\right) + Q - W = \dot{m}\left(h_2 + \frac{c_2^2}{2} + z_2 g\right)$$

لا يوجد شغل ميكانيكي وبإهمال التغير في طاقة الحركة وطاقة الوضع يؤول القانون الأول إلى:

$$Q = \dot{m}\;(h_2 - h_1)$$

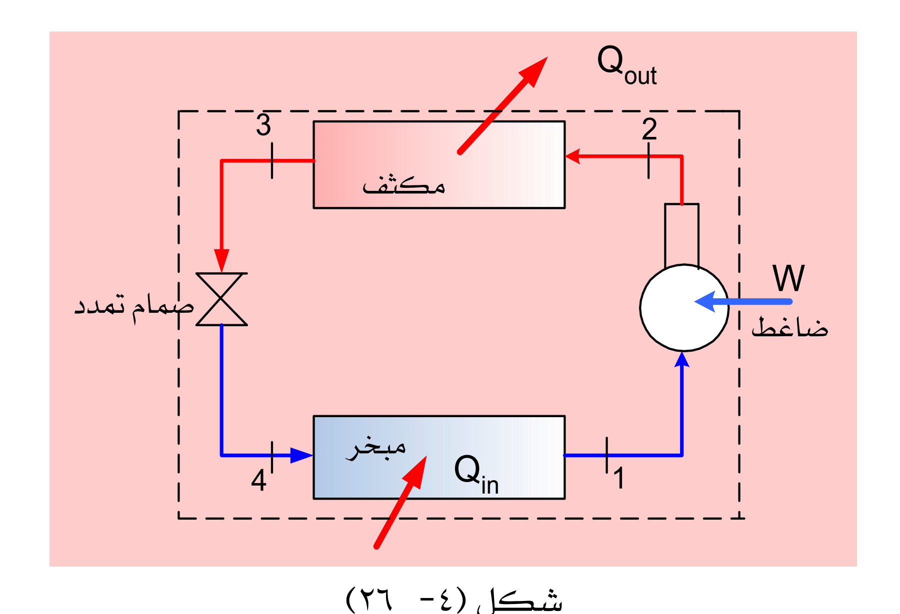
أي أن الحرارة تساوي التغير في الانثالبي بين مخرج ومدخل أي من المكثف أو المبخر.

ففي حالة المكثف :

$$Q_{out} = \dot{m}\,(h_2 - h_3) \qquad (4-17)$$

وفي حالة المبخر:

$$Q_{in} = \dot{m}\;(h_1 - h_4) \qquad (4-18)$$

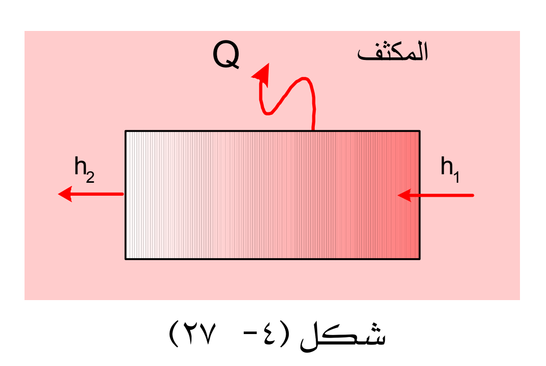


شكل (٤- ٢٦)

مثال

احسب الحرارة المطرودة من مكثف في دائرة التبريد لكل كيلوجرام في الثانية إذا كانت الإنثالبي لوسيط التبريد R-134a الداخل للمكثف هي 417 kJ/kg، والإنثالبي لوسيط التبريد الخارج من المكثف 241.63 kJ/kg.

الحل:



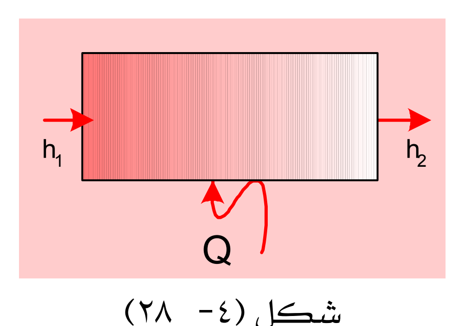
شكل (٤- ٢٧)

بالإشارة إلى شكل (٤- ٢٧) وبتطبيق القانون الأول على المكثف:

لا يوجد شغل على المكثف ويمكن إهمال التغير في طاقة الحركة وطاقة الوضع:

$$\frac{Q}{\dot{m}} = (h_2 - h_1) = 241.63 - 417 = -175.37 \; kJ/kg$$

علامة السالب هنا تدل على أن الحرارة مطرودة من المكثف.



شكل (٤- ٢٨)

مثال

احسب الحرارة المضافة إلى المبخر لكل كيلوجرام في الثانية الموضحة في الشكل (٤ ـ٢٨)، إذا كانت الانثالبي لوسيط التبريد R-134a الداخل للمبخر 256 kJ/kg، والانثالبي لوسيط التبريد الخارج من المبخر 396 kJ/kg

الحل:

بتطبيق القانون الأول على المبخر:

لا يوجد شغل على المبخر ويمكن إهمال التغير في طاقة الحركة وطاقة الوضع:

$$\frac{Q}{\dot{m}} = (h_2 - h_1)$$

$$\frac{Q}{\dot{m}} = 396 - 256 \quad = 140 \ {kJ}/{kg}$$

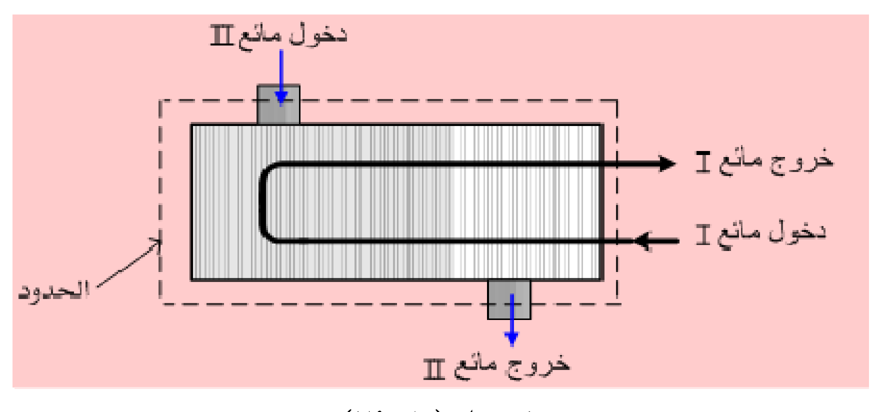
المبادل الحراري: Heat Exchanger

تنتقل الحرارة فيه بين مائعين غير مختلطين كما في الشكل (٤- ٢٩).

نطبق القانون الأول للديناميكا الحرارية على كل مائع على حدة (لا يوجد شغل ويمكن إهمال التغير في طاقة الحركة وطاقة الوضع):

للمائع الأول

$$Q_I = \dot{m}_I \,(h_{I2} - h_{I1})$$



شكل (٤ـ٢٩)

للمائع الثاني:

$$Q_{\Pi} = \dot{m}_{\Pi} \ (h_{\Pi 2} - h_{\Pi 1})$$

لابد من ملاحظة أن الحرارة المكتسبة لأحد المائعين تساوي الحرارة المفقودة من المائع الآخر.

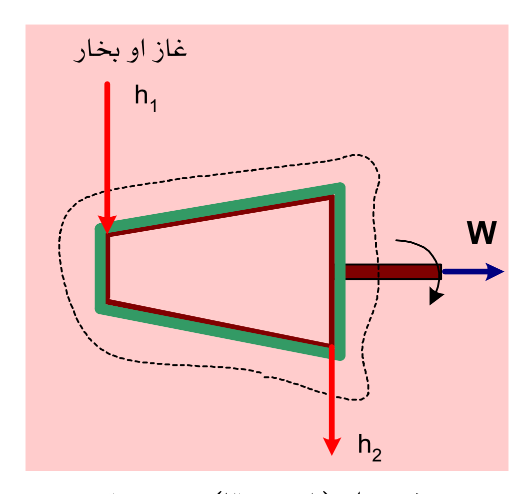
أي أن $Q_{I} = -Q_{\Pi}$

ثانياَ أنظمة بها شغل ميكانيكي:

التوربين: Turbine

تستخدم التوربينات البخارية و الغازية في توليد الطاقة الكهربية. بتطبيق القانون الأول للديناميكا الحرارية مع إهمال التغير في طاقة الحركة وطاقة الوضع وكذلك الحرارة المفقودة(شكل ٤- ٣٠):

$$\therefore \ -w = h_2 - h_1$$



شكل (٤- ٣٠) تور بينة

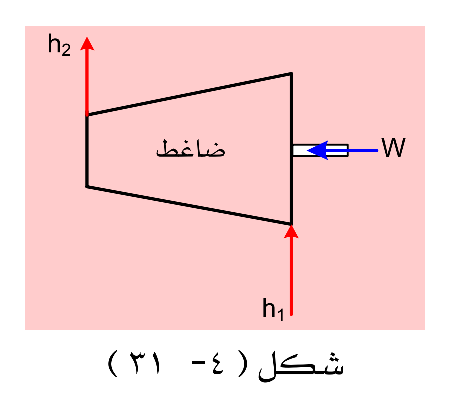
وحيث إن h_1 أكبر من h_2 عليه فإن الشغل المعمول بواسطة التوربين هو شغل موجب

$$\therefore w = h_1 - h_2$$

الضاغط: Compressor

يعمل الضاغط (شكل ٤- ٣١) على رفع ضغط وسيط التبريد. وبإهمال الحرارة المفقودة وإهمال التغير في كل من طاقة الحركة والوضع فإن القانون الأول للديناميكا الحرارية يؤول إلى الصورة التالية:

$$w = -(h_2 - h_1)$$



شكل (٤- ٣١)

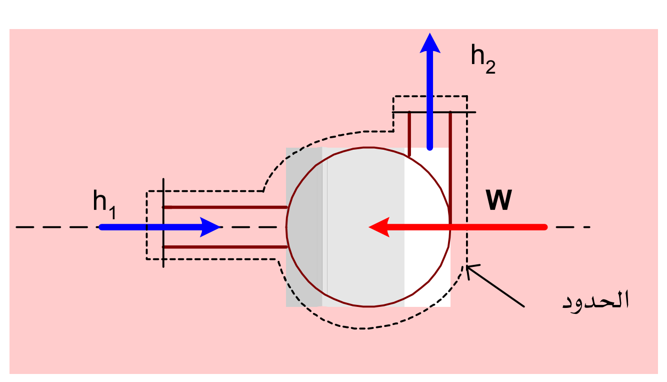
علامة السالب تدل على أن الشغل معمول بواسطة البيئة على النظام.

المضخة: Pump

بالإشارة إلى شكل (٤- ٣٢) وتطبيق القانون الأول للديناميكا الحرارية كما في حالة الضاغط نصل إلى:

$$w = -(h_2 - h_1)$$

و بالتالي فإن الشغل يكون سالبا وهو شغل عمل بواسطة البيئة على النظام.



شكل (٤- ٣٢) مضخة

أنظمة لا وجود للحرارة و الشغل فيها:

- الفونية أو الرشاش أو الحاقن: **Nozzle**

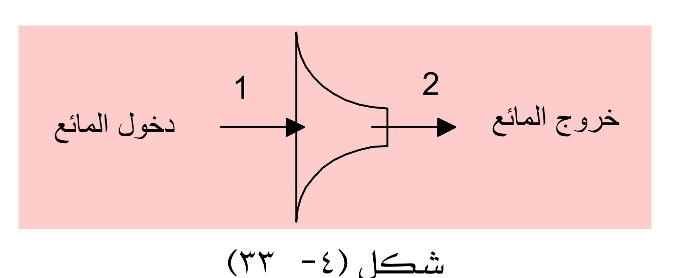
هذا نظام مفتوح و مستقر و يستخدم لزيادة سرعة الموائع كما يتضح من شكل (٤- ٣٣).

بتطبيق القانون الأول للديناميكا الحرارية و بإهمال الحرارة والشغل يكون:

$$q - w = \Delta h + \frac{\Delta c^2}{2}$$

$$h_2 - h_1 = -\left(\frac{c_2^2}{2} - \frac{c_1^2}{2}\right)$$

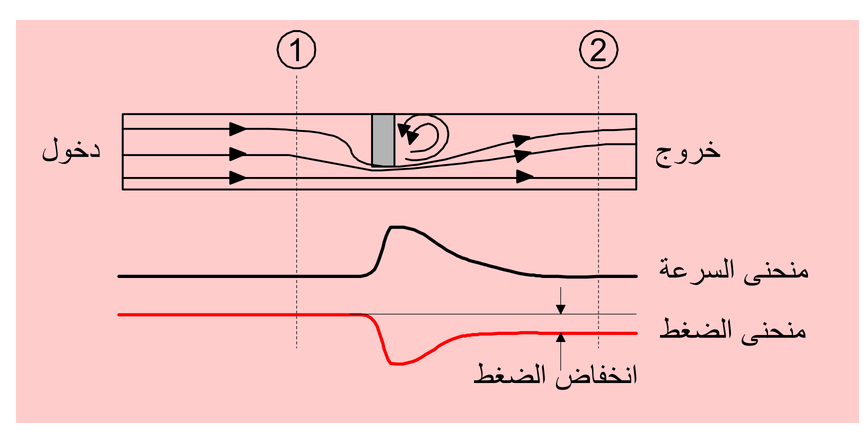
$$\frac{c_2^2}{2} = \frac{c_1^2}{2} + (h_1 - h_2) \qquad (4-19)$$



شكل (٤- ٣٣)

- صمام التمدد

وظيفة صمام التمدد هي خفض ضغط الموائع حيث يدخل المائع بضغط مرتفع ويخرج بضغط منخفض كما يتضح من شكل (٤- ٣٤). يصاحب ذلك ارتفاع لحظي في سرعة المائع عند عنصر الخنق في الصمام وسرعان ما تنخفض لتعود لنفس قيمتها عند المدخل.



شكل (٤- ٣٤) صمام التمدد

بتطبيق القانون الأول بين مدخل ومخرج الصمام:

$$q - w = h_2 - h_1 + \frac{c_2^2 - c_1^2}{2}$$

وحيث إنه لا يوجد شغل والحرارة مهملة والسرعة ثابتة

$$\therefore h_2 = h_1 \qquad (4-20)$$

أي أن الإنثالبي ثابتة قبل وبعد الصمام.

مثال

يدخل بخار إلى صمام تمدد بإنثالبي 100 kJ أوجد الإنثالبي عند مخرج الصمام.

الحل

حيث إن الإنثالبي ثابتة خلال الصمام

$$\therefore h_2 = h_1 = 100\ kJ$$

الفصل الثالث

القانون الثاني للديناميكا الحرارية
The Second Law Of Thermodynamics

مقدمة :

لو تأملنا الطبيعة لوجدنا الماء يتدفق طبيعيا من أعلى الجبال إلى سفوحها والحرارة تسري من الأجسام ذات درجات الحرارة العالية إلى تلك الأجسام التي لها درجات حرارة منخفضة وكذلك الغازات تتمدد من الحالة ذات الضغط العالي إلى الحالة ذات الضغط المنخفض. هذه الظواهر والعمليات لا يمكن أن تعكس اتجاهها بدون استخدام تأثير خارجي. وبالتالي فإننا في حاجة إلى مضخة لضخ الماء من الخزانات في أسفل المنازل إلى تلك الخزانات في أسطح المنازل وإلى ضواغط لضغط الغازات من ضغوط منخفضة إلى ضغوط عالية ونحتاج أيضا إلى مجموعة من العناصر لنقل الحرارة من المنطقة ذات درجات الحرارة المنخفضة إلى المنطقة ذات درجات الحرارة العالية.

ينص القانون الثاني للديناميكا الحرارية في معناه الواسع على أن الإجراءات تسير دائما في اتجاه محدد وليس في الاتجاه العكسي. فالكأس من الشاي الساخن يبرد بانتقال الحرارة منه للبيئة الباردة حوله، ولكن الحرارة لن تنتقل من البيئة الباردة إلى كأس الشاي الساخن.

لقد ناقش القانون الأول للديناميكا الحرارية خاصية بقاء الطاقة و تحولها من صورة إلى أخرى حيث لا يوجد فرق بين أي نوع من أنواع هذه الطاقات. فمثلاً طبقاً للقانون الأول يمكن تحويل كل الحرارة المضافة في آلة حرارية إلى شغل مفيد والعكس. وهذا مخالف للمشاهدة العملية حيث لا يمكن تحويل كل الحرارة إلى شغل، بل يجب طرد جزء من هذه الحرارة إلى الجوار حتى تتم عملية التحويل. مثال ذلك ما يحدث في آلة الاحتراق الداخلي حيث يتحول حوالي 20% من طاقة الوقود إلى شغل مفيد ويطرد 80% إلى الجوار في صورة حرارة لتبريد المحرك وغازات عادم.

ونظراً لقصور القانون الأول في تحديد نسبة الحرارة التي يمكن تحويلها إلى شغل لذا فقد حل محله القانون الثاني في هذه الجزئية، حيث يتعامل مع الحرارة على أنها مصدر للطاقة ذات قيمة أقل من الشغل. أي أن الشغل أغلى من الحرارة، بمعنى أن الشغل يمكن أن يتحول كله إلى حرارة ولكن الحرارة لا يمكن أن تتحول كلها إلى شغل.

هناك منطوقان للقانون الثاني للديناميكا الحرارية:

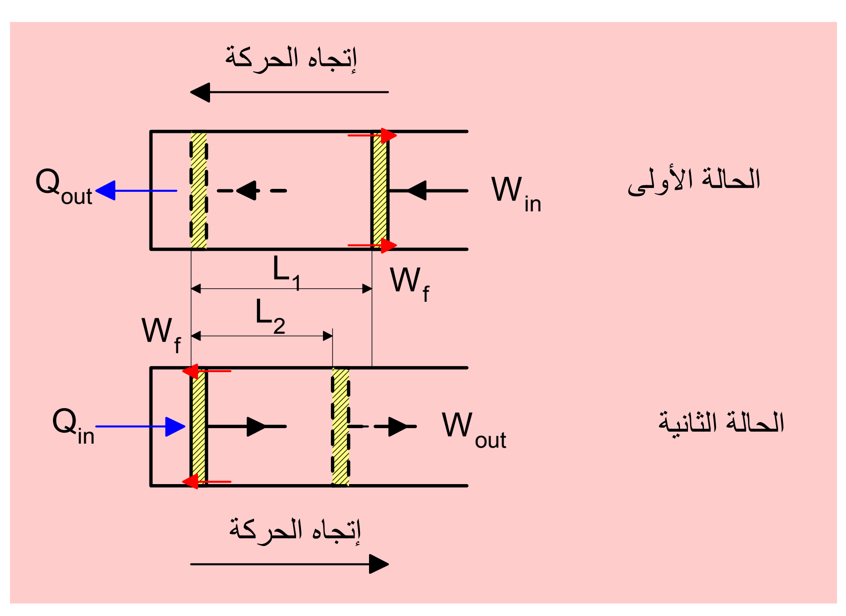
- "لا يمكن بناء محرك حراري يعمل تبعا لدورة كاملة ينتج شغلاً ويتعامل مع مصدر حراري واحد".

- " لا يمكن أن تسري الحرارة من جسم ذي درجة منخفضة إلى آخر ذي درجة مرتفعة بدون مساعدة خارجية".

وقبل أن نشرح منطوقي القانون الثاني لابد لنا أن نتطرق أولاً إلى بعض المفاهيم الهامة مثل الانعكاسية والإنتروبي والتي تمهد لفهم هذين المنطوقين.

الانعكاسية Reversibility

يسمى الإجراء انعكاسياً إذا أمكن عكسه تماماً بدون أن يحدث تغير في الجوار. ولكي نفهم مفهوم الانعكاسية نأخذ حالة نظام يجري عليه إجراء انضغاط بثبوت درجة الحرارة ثم تمدد بثبوت درجة الحرارة عن طريق مكبس يتحرك داخل أسطوانة كما هو مبين في شكل (٤- ٣٥).



شكل (٤-٢٩) الانعكاسية

في الحالة الأولى: لكي يتحرك المكبس إلى اليسار حتى يصل إلى نهاية مشواره يجب أن ندفعه بقوة معينة مما يحتاج منا إلى بذل شغل قدره W_{in}. ولكي تحتفظ محتويات الأسطوانة بدرجة حرارتها ثابتة أثناء هذا الإجراء يجب أن تزال منها كمية من الحرارة قدرها Q_{out}. وحيث إن المكبس أثناء حركته للداخل يعاني من احتكاك يبدد من طاقة المجموعة لذا فإن الشغل المبذول على النظام تبعاً للقانون الأول للديناميكا الحرارية يساوي مجموع الحرارة المزالة وشغل الاحتكاك(W_f) أي أن:

$$W_{in} = Q_{out} + W_f$$

في الحالـة الثانيـة: إذا أردنـا أن نعكـس الإجـراء السـابق يجـب إضـافة كميـة مـن الحـرارة Q_{in} لمحتويـات الأسطوانة مساوية لتلك التي أزلناها حتى يعكس المكبس من حركته. وهنا يتبادر إلى الذهن سؤال: هل يصل المكبس إلى وضعه الأول أم لا، يظهر ذلك من التحليل التالي:
بتطبيق القانون الأول على الحالة الثانية مع العلم بأن الاحتكاك يعاكس الحركة دائماً:

$$Q_{in} = W_{out} + W_f$$

وحيث إن Q_{in} مساوية لـ Q_{out} لذا:

$$W_{in} = W_{out} + 2W_f$$

وحيث إنه لا يمكن الاستفادة من شغل الاحتكاك W_f لذا فإنه لا يمكن الحصول على نفس الشغل الذي أضفناه وبالتالي لن يصل المكبس إلى وضعه الأول. لذا يقال لمثل هذا الإجراء إنه إجراء غير انعكاسي irreversible.

وبالتالي إذا أردنا أن نجري إجراء انعكاسيا فعلينا أن نبحث عن إجراء لا يصاحبه احتكاك أثناء حركة المكبس، وذلك غير ممكن عملياً من واقع التجارب المشاهدة. لذلك يمكن القول أن الإجراء الانعكاسي هو إجراء غير حقيقي تصوري فقط. ويستفاد منه عندما تنسب إليه الإجراءات الحقيقية المماثلة فنعرف مدى قرب أو حيود هذه الإجراءات من الحالة التصورية وبالتالي يمكن أن نقدر مقدار فقدان الطاقة نتيجة لهذا الإجراء الحقيقي.

مثال

تضاف حرارة مقدارها 50 kJ إلى منظومة خلال إجراء ثبوت درجة الحرارة لتعطي شغلاً مستفاداً قدره 40 kJ. ما مدى حيود هذا الإجراء عن الحالة المثالية بفرض أن الفرق بين الحرارة والشغل ضائع كله في الاحتكاك.

الحل

بتطبيق القانون الأول للديناميكا الحرارية خلال هذا الإجراء:

$$\because Q = W_{out} + W_f$$

$$\therefore W_f = 50 - 40 = 10 \qquad kJ$$

أي أننا نفقد 10 kJ لكل 50 kJ حرارة مضافة، وبالتالي يمكن القول أن كفاءة هذا الإجراء هي:

$$\eta = \frac{40}{50} = 0.8$$

وهكذا نرى أن الاحتكاك يمثل أحد العوامل التي تحد من تحول كل الحرارة إلى شغل مفيد وبالتالي تحيد الإجراءات التي يصاحبها احتكاك عن الإجراءات الانعكاسية.

وهناك عامل آخر من عوامل حيود الإجراءات عن مثالية الإجراء الانعكاسي وهو انتقال الحرارة بسبب وجود فرق في درجات الحرارة. وهذان العاملان هما السببان الرئيسان لحيود كافة الإجراءات الحقيقية عن الإجراءات الانعكاسية. ويمكن تحديد مدى حيود أي إجراء حقيقي عن الإجراء الانعكاسي بخاصية جديدة تسمى الإنتروبي. وفيما يلي شرح مبسط لهذه الخاصية.

الإنتروبي:

هي مقياس لمدى حيود الإجراءات الحقيقية عن مسارات الإجراءات الانعكاسية. كما تمكن الإنتروبي بناءً على بعض الحسابات من تحديد الاتجاهات الممكنة لإجراءات تحول الطاقة كي تحدث في الواقع العملي.

وترتبط خاصية الإنتروبي بالحرارة المضافة أو المزالة خلال إجراء معين كالتالي:

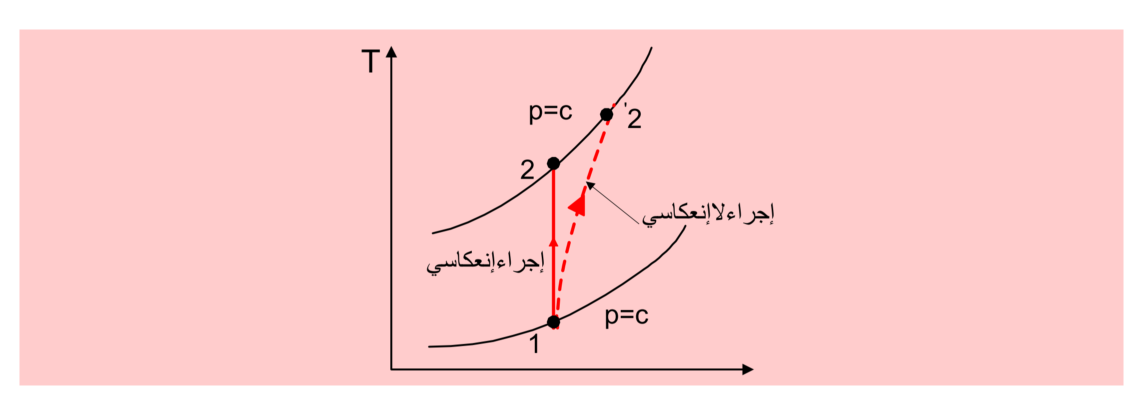
$$\int_1^2 ds \geq \int_1^2 \frac{dQ}{T} \qquad (4-21)$$

أي أن التغير في الإنتروبي ds أكبر أو يساوي التغير في الحرارة المضافة إلى إجراء معين dQ مقسوماً على درجة الحرارة خلال هذا الإجراء. وتطبق علامة = عندما يكون الإجراء انعكاسياً أما العلامة > فتطبق للإجراء اللا انعكاسي.

يتضح من المعادلة (4-21) أنه لا يحدث تغير في الإنتروبي في حالة الإجراء الأدياباتي الانعكاسي $(dQ=0)$ أما الإجراء الأدياباتي اللاانعكاسي (الحقيقي) فيكون التغير في الإنتروبي موجباً دائماً كما يتضح ذلك من الشكل (٤- ٣٦).

إجراء انعكاسي 2-1: $ds = 0$ (4-21)

إجراء لاانعكاسي '2-1: $ds > 0$ (4-22)



شكل (٤- ٣٦) تغير الإنتروبي للإجراء الانعكاسي واللاإنعكاسي

ويمكن الجزم بأنه كلما زاد التغير الموجب في الإنتروبي للإجراء الأدياباتي كلما كان حيوده عن الإجراء اللانعكاسي أكبر وبالتالي يزداد فقدان الطاقة وتقل كفاءة هذا الإجراء. تعطى الكفاءة الايسنتروبيكية η_{isent} بالمعادلة التالية:

$$\eta_{isent} = \frac{W_{isent}}{W_{actual}}$$

حيث W_{isent} هو الشغل الايسنتروبيكي و W_{actual} هو الشغل الحقيقي.

$$\eta_{isent} = \frac{h_2 - h_1}{h_{2'} - h_1}$$

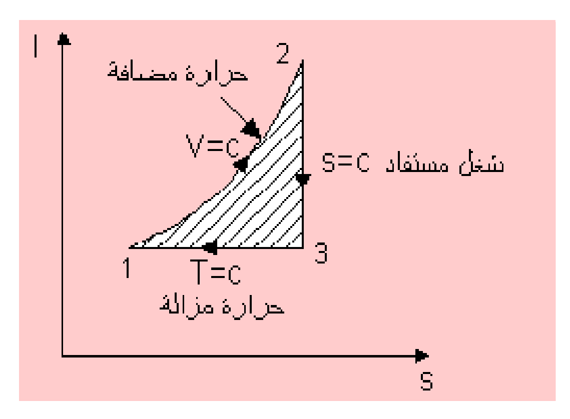
يتبقى القول بأن الإنتروبي خاصية للمواد لا تعتمد على المسار الذي يسلكه الإجراء للوصول من حالة إلى أخرى بل تعتمد فقط على الحالة التي وصلت إليها. فالهواء مثلاً عند درجة حرارة معينة وضغط معين له قيمة إنتروبي معينة لا تعتمد على الطريقة التي وصل بها الهواء إلى هذه الحالة.

الآلات الحرارية Heat Engines

يرتبط القانون الثاني ارتباطاً وثيقاً بما يسمى بالآلة الحرارية التي من خلالها يتبين أنه لا يمكن الحصول على شغل من مصدر حراري واحد خلال دورة حرارية. فالآلة الحرارية عبارة عن منظومة ثيرموديناميكية تهدف إلى إنتاج شغل موجب و ذلك بامتصاص حرارة من مصدر عند درجة حرارة عالية (مصدر حراري Source) لتحول جزء من هذه الحرارة إلى شغل ثم تطرد الباقي إلى مصب حراري Sink عند درجة حرارة منخفضة. القانون الثاني للديناميكا الحرارية يوجب وجود مصدر أو منبع حراري ووجود مصب حراري تطرد فيه جزء من الحرارة المضافة.

.ويمكن تفسير ضرورة وجود مصدرين حراريين في الدورة الحرارية بالرجوع إلى الشكل (٤- ٣١) كالتالي:

لنتصور وجود دورة حرارية تضاف فيها الحرارة خلال الإجراء 2-1 بثبوت الحجم (الشغل يساوي صفر)، ثم يحدث تمدد خلال الإجراء 3-2 فنحصل على شغل مفيد. ولكي تتم الدورة يجب أن تعود الحالة 3 إلى الحالة 1 بأي وسيلة. والوسيلة الوحيدة الممكنة هي إزالة حرارة من المنظومة عند الحالة 3 لتتمكن من الوصول إلى الحالة 1. ويمكن أن يتم ذلك من خلال إجراء تبريد وليكن بثبوت درجة الحرارة كما يتضح من الشكل (٤- ٣٧). ومن ذلك التحليل يتبين لنا ضرورة وجود مصدرين للحرارة خلال الدورة التي تنتج شغلاً، الأول يضيف حرارة عند درجة حرارة مرتفعة والثاني يزيل حرارة عند درجة حرارة منخفضة.



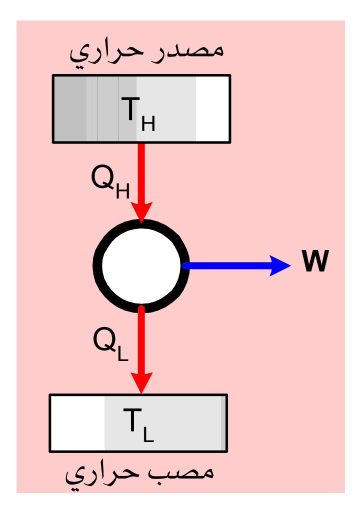
شكل (٤- ٣٧) دورة حرارية

ويوضح الشكل (٤- ٣٨) هذا المفهوم من خلال رسم تخطيطي للآلة الحرارية حيث Q_H هي الحرارة المضافة من المنبع وQ_L هي الحرارة المطرودة للمصب و W هو الشغل المستفاد من الآلة الحرارية. وبتطبيق القانون الأول للديناميكا الحرارية هذه الآلة نجد أن محصلة الحرارة المضافة والمزالة تساوي محصلة الشغل المعمول. أو

$$\sum Q = \sum W$$

وحيث إن محصلة الحرارة تساوي الحرارة المضافة Q_H ناقصا الحرارة المطرودة Q_L.

$$Q_H - Q_L = W \qquad (4-23)$$



شكل (٤- ٣٨) آلة حرارية

وبالتالي فإن الحرارة المضافة تكون أكبر من الشغل، بمعنى أنه لا يمكن تحويل كل الحرارة المضافة إلى شغل. ويمكن معرفة قيمة الشغل المستفاد من كفاءة هذه الآلة η_{th} كالتالي:

$$\eta_{th} = \frac{W}{Q_H} \qquad (4-24)$$

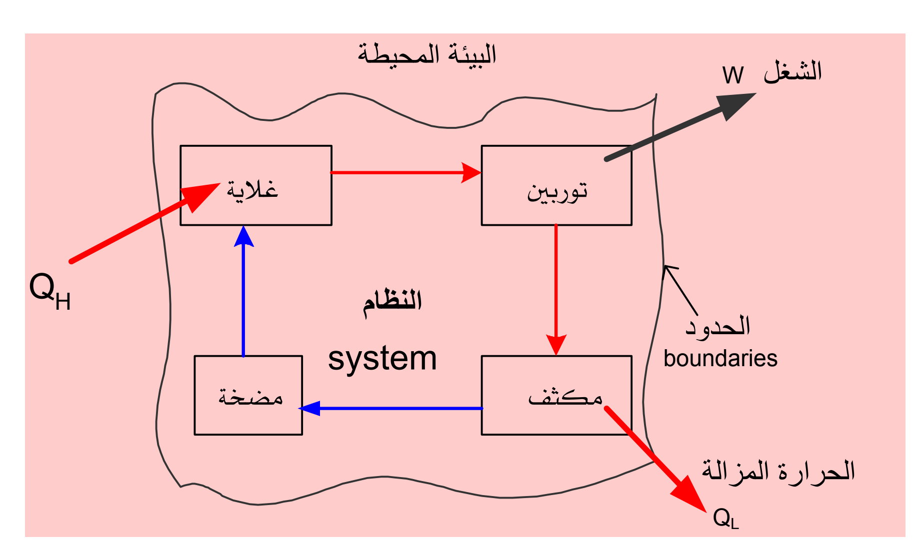
نعوض عن الشغل:

$$\eta_{th} = \frac{Q_H - Q_L}{Q_H}$$

$$\eta_{th} = 1 - \frac{Q_L}{Q_H} \qquad (4-25)$$

يتضح من المعادلة (4-25) أنه كلما قلت قيمة الحرارة المطرودة كلما زادت كفاءة الآلة الحرارية.

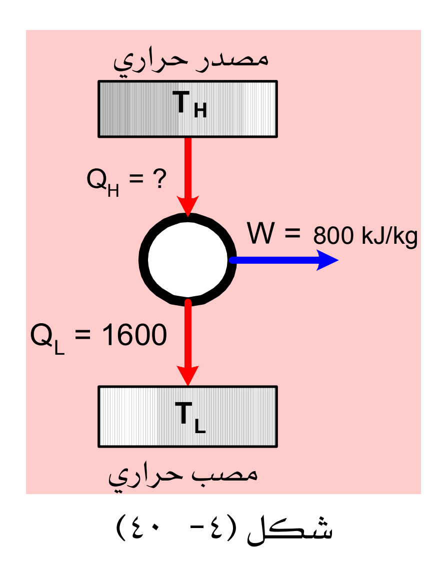
من أمثلة الآلات الحرارية المعروفة محطة القدرة البخارية (steam power plant) الموضحة في شكل (٤-٣٩) والتي تتكون من غلاية وتوربين ومكثف ومضخة. تعتبر مكونات هذه المحطة في مجملها آلة حرارية. ويكون الماء (بخار) هو النظام أو المادة الشغالة. فهناك حرارة Q_H تضاف في الغلاية وQ_L تطرد في المكثف بعد إنتاج شغل W في التوربين. يعتبر شغل المضخة صغيرا جدا مقارنة بالشغل المعمول في التوربين ولذلك يمكن إهماله.



شكل (٤- ٣٩) محطة القدرة البخارية كآلة حرارية

مثال:

آلة حرارية تطرد حرارة قيمتها 1600 kJ/kg وتنتج شغلاً قدره 800 kJ/kg. **احسب** الحرارة المضافة للآلة وكفاءتها الحرارية.



شكل (٤- ٤٠)

الحل:

تمثيل الآلة موضح بشكل (٤- ٤٠)، نطبق القانون الأول على الآلة الحرارية:

$$Q_H - Q_L = W$$

$$Q_H = 1600 + 800 = 2400 \; kJ/kg$$

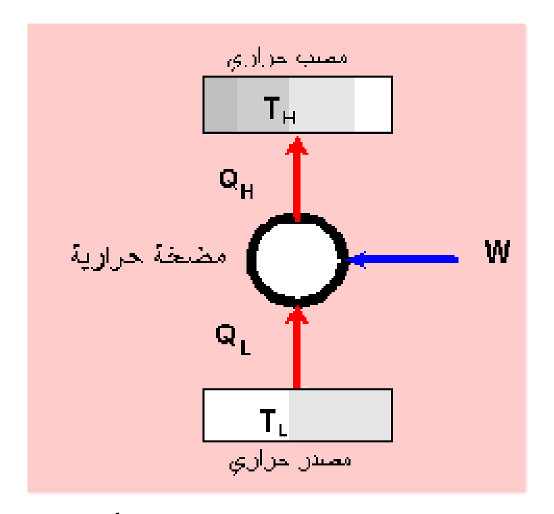
نحسب الكفاءة الحرارية للآلة الحرارية:

$$\eta_{th} = \frac{W}{Q_H}$$

$$\eta_{th} = \frac{800}{2400} = 0.3333 = 33.33\ \%$$

المضخة الحرارية و الثلاجة : The Heat Pump & The Refrigerator

تعمل المضخة الحرارية أو الثلاجة طبقا لدورة معكوسة بالنسبة للآلة الحرارية، فهي تمتص الحرارة بمعدل Q_L من مصدر عند درجة حرارة منخفضة T_L و تطرد حرارة بمعدل Q_H إلى مصب درجة حرارته عالية عند T_H و تستهلك شغل بمعدل W كما في الشكل.



شكل (٤- ٤١) مضخة حرارية أو ثلاجة

بتطبيق القانون الأول للديناميكا الحرارية

$$W = Q_H - Q_L$$

نظراً لأن كفاءة الثلاجة تكون أكبر من الوحدة لذا يستعاض عنها بمعامل الأداء Coefficient Of Performance(COP). الهدف من الثلاجة هو الحرارة الممتصة من المستودع ذي درجة الحرارة المنخفضة Q_L، أما الطاقة التي تعطى من خارج المنظومة فهي الشغل W وبالتالي فإن معامل الأداء للثلاجة يمكن أن يعبر عنه بالمعادلة التالية:

$$COP_{REF} = \frac{Q_L}{W} = \frac{Q_L}{Q_H - Q_L} = \frac{1}{\left(Q_H / Q_L\right) - 1} > 1 \qquad (4-26)$$

أما إذا كانت الحرارة Q_H هي الهدف فإن الآلة تسمى في هذه الحالة المضخة الحرارية ويكون معامل الأداء كالتالي:

$$COP_{HP} = \frac{Q_H}{W} = \frac{Q_H}{Q_H - Q_L} = \frac{1}{1-\left(Q_L/Q_H\right)} > 1 \qquad (4-27)$$

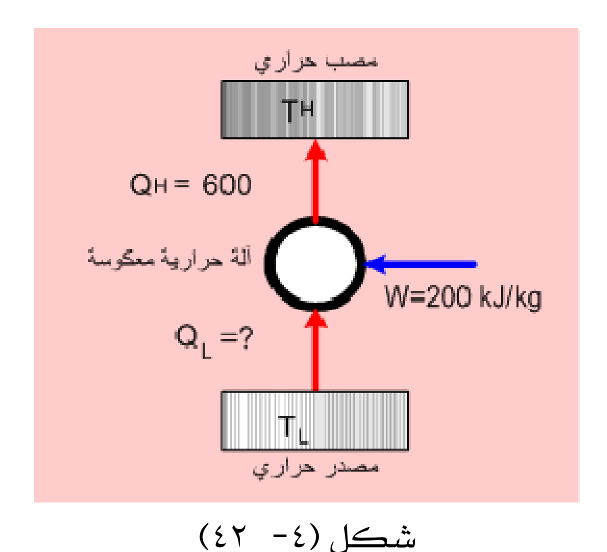
يمكن ملاحظة العلاقة بين معامل الأداء للثلاجة ومعامل الأداء للمضخة الحرارية:

$$COP_{HP} - COP_{REF} = 1 \qquad (4-28)$$

مثال:

في دورة آلة حرارية معكوسة (شكل ٤- ٤٢) إذا كان الشغل المبذول على النظام يساوي 200 kJ/kg وكانت الحرارة المطرودة من النظام 600 kJ/kg ما هي قيمة الحرارة المضافة للنظام. احسب معامل أداء هذه الماكينة إذا استخدمت:

- كثلاجة.
- كمضخة حرارية.



شكل (٤- ٤٢)

الحل:

لحساب الحرارة المضافة (Q_A) من الآلة الحرارية نطبق القانون الأول للديناميكا الحرارية على الدورة كما تبدو من الشكل (٤- ٤٢):

$$W = Q_L - Q_H$$

$$-200 = Q_L - 600$$

إذن الحرارة المضافة:

$$\therefore Q_L = 400\ kJ/kg$$

لحساب معامل الأداء للثلاجة:

$$COP_{REF} = \frac{Q_L}{W}$$

$$COP_{REF} = \frac{400}{200} = 2$$

ولحساب معامل الأداء للمضخة الحرارية:

$$COP_{HP} = \frac{Q_R}{W}$$

$$COP_{HP} = \frac{600}{200} = 3$$

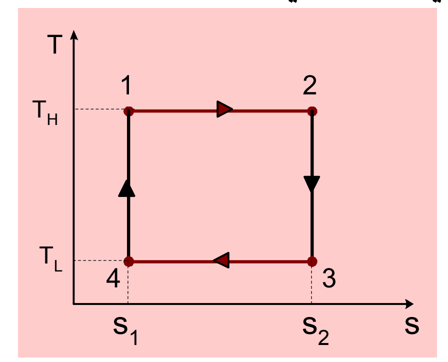
الجدير بالملاحظة هنا أن معامل الأداء للمضخة الحرارية يساوي معامل الأداء للثلاجة + ١.

الآلة الحرارية المثالية(دورة كارنوت) :The Carnot Cycle

كما ذكرنا من قبل أن السببين الرئيسين الذين يجعلان الإجراءات الحقيقية تحيد عن المثالية هما الاحتكاك وانتقال الحرارة مع وجود فرق في درجات الحرارة، لذا اقترح كارنوت دورة حرارية مثالية خالية من هذين السببين تكون بمثابة دورة مرجعية لكافة الدورات الحقيقية وبالتالي تكون كفاءتها أعلى كفاءة.

يوضح شكل (٤- ٤٣) تمثيل دورة كارنوت المثالية على خريطة T-S وهي تتكون من الإجراءات التالية:

- الإجراء 2-1 إضافة حرارة بثبوت درجة الحرارة.
- الإجراء 3-2 تمدد أدياباتي انعكاسي.
- الإجراء 4-3 إزالة حرارة بثبوت درجة الحرارة.
- الإجراء 1-4 انضغاط أدياباتي انعكاسي.



شكل (٤- ٤٣) دورة كارنوت المثالية

يمكن حساب الكفاءة الحرارية لدورة كارنوت كالتالي:

$$\eta_{th} = 1 - \frac{Q_L}{Q_H} \qquad (4-29)$$

بالاستعانة بالمعادلة (٤- ٢١) للإجراء الانعكاسي:

$$\int_1^2 ds = \int_1^2 \frac{dQ}{T}$$

ومنها يمكن إيجاد الحرارة بدلالة الإنتروبي في إجراء ثبوت درجة الحرارة كالتالي:

$$Q = \int_1^2 T\ ds = T\,(s_2 - s_1) \qquad (4-30)$$

ومنها :

$$Q_H = T_H(s_2 - s_1)$$

$$Q_L = T_L(s_1 - s_2)$$

إذن يمكن استنتاج الكفاءة الحرارية لدورة كارنوت:

$$\eta_c = 1 - \frac{Q_L}{Q_H} = 1 - \frac{T_L(s_2 - s_1)}{T_H(s_2 - s_1)} = 1 - \frac{T_L}{T_H} \qquad (4-31)$$

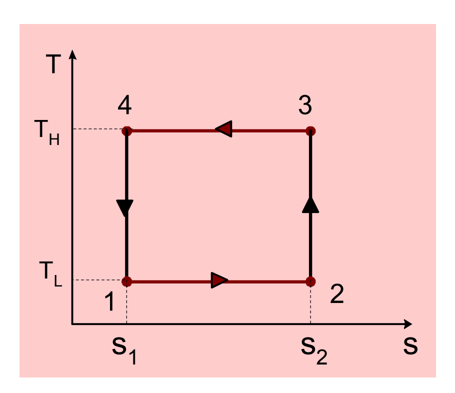
كما يمكن استنتاج الشغل الناتج عن دورة كارنوت كالآتي:

$$W = \eta_c\, Q_H \qquad (4-32)$$

الثلاجة أو المضخة الحرارية (دورة كارنوت المعكوسة)

يوضح الشكل (٤- ٤٤) دورة كارنوت المعكوسة المثالية وتتكون من الإجراءات التالية:

- الإجراء 1-2 إضافة حرارة بثبوت درجة الحرارة.
- الإجراء 2-3 انضغاط أدياباتي انعكاسي.
- الإجراء 3-4 إزالة حرارة بثبوت درجة الحرارة.
- الإجراء 4-1 تمدد أدياباتي انعكاسي.



شكل (٤- ٤٤) دورة كارنوت المعكوسة

يمكن حساب Q_H وحساب Q_L و W ومن ثم حساب معامل الأداء للدورة:

$$Q_L = T_L(s_2 - s_1)$$

$$Q_H = T_H(s_1 - s_2)$$

الشغل الناتج عن دورة كارنوت المعكوسة يمكن استنتاجه بتطبيق القانون الأول للديناميكا الحرارية:

$$\sum Q = \sum W$$

$$W = Q_H + Q_L = -(T_H - T_L)(s_2 - s_1)$$

إذن يمكن استنتاج معامل أداء الثلاجة التي تعمل تبعاً لدورة كارنوت المعكوسة:

$$COP_{REF} = \frac{Q_L}{W} \qquad (4-33)$$

وحيث إن الشغل سالب، لذا يعوض عنه بقيمته الموجبة

$$COP_{REF} = \frac{T_L(s_2 - s_1)}{(T_H - T_L)(s_2 - s_1)} = \frac{T_L}{T_H - T_L} \qquad (4-34)$$

أما معامل الأداء للمضخة الحرارية عندما تكون الدورة هي دورة كارنوت المعكوسة فهو كالتالي:

$$COP_{HP} = \frac{Q_H}{W} \qquad (4-35)$$

$$COP_{HP} = \frac{T_H(s_2 - s_1)}{(T_H - T_L)(s_2 - s_1)} = \frac{T_H}{T_H - T_L} \qquad (4-36)$$

مثال

ثلاجة تعمل تبعاً لدورة كارنوت المعكوسة بين درجتي حرارة $40\ ^{o}C, -10\ ^{o}C$ ، احسب معامل أداء الثلاجة.

الحل

$$COP_{REF} = \frac{T_L}{T_H - T_L}$$

$$COP_{REF} = \frac{-10 + 273}{40 + 10} = 5.26$$

اختبار ذاتي

الديناميكا الحرارية

السؤال الأول:

(أ) عرف: النظام الثيرموديناميكي، حالة النظام، الإجراء الثيرموديناميكي، العملية الانعكاسية، الشغل.

(ب) بُرد غاز درجة حرارته 27°C تحت ضغط ثابت حتى أصبحت درجة حرارته 7°C فإذا كان الحجم الابتدائي للغاز $8m^3$ فما هو الحجم النهائي وما هو الشغل المبذول علما بأن كتلة الغاز تساوي 10kg. خذ ثابت الغازات لهذا الغاز R = 320 J/kg K.

السؤال الثاني:

في إجراء ذي درجة حرارة ثابتة isothermal، إذا كان ضغط المائع في البداية يساوي 200 kPa والحجم 2 m^3، احسب الشغل لهذا الإجراء إذا كان الحجم النهائي يساوي 4 m^3. الشغل لهذا الإجراء يعطى بواسطة المعادلة:

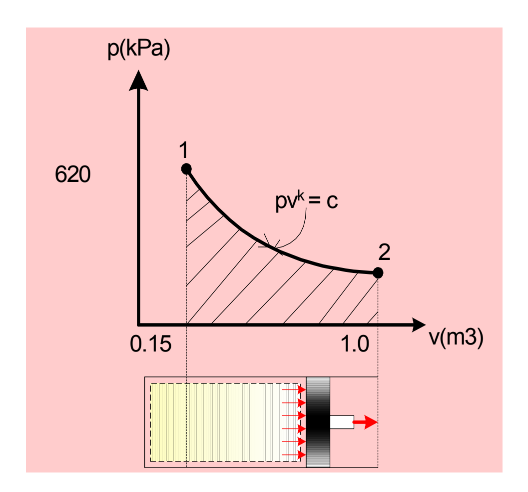
$$W = \int p dV = p_1 V_1 (\ln \frac{V_2}{V_1})$$

السؤال الثالث:

في منظومة مكبس وأسطوانة إذا كان هناك ضغط ثابت قدره 2.3 MN/m^2 يعمل على المكبس والذي قطره 7.5 cm، احسب الشغل عندما يتحرك هذا المكبس مسافة وقدرها 8 cm.

السؤال الرابع:

الشكل التالي يوضح عملية تمدد أديباتيكية احسب الشغل المعمول بواسطة النظام على البيئة حوله. اتخذ k=1.4



السؤال الخامس:

(أ) اكتب نص القانون الأول للديناميكا الحرارية بصورة عامة. ومن ثم اكتب صيغ القانون الأول عندما يطبق على نظام مغلق وآخر مفتوح.

(ب) في ضاغط هواء إذا تم شوط الانضغاط تحت طاقة داخلية ثابتة وكانت الحرارة المطرودة إلى مائع التبريد تساوي 50 kJ/kg، احسب الشغل المعمول على الضاغط خلال هذا الشوط.

السؤال السادس:

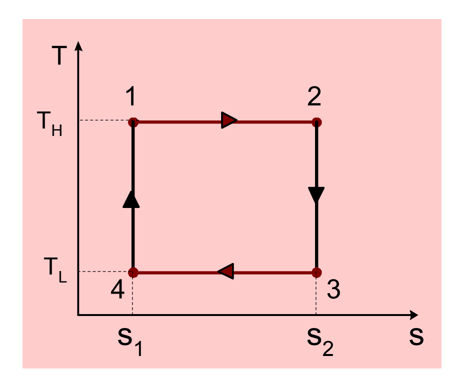
في دورة القدرة البخارية، يدخل البخار للمكثف بانثالبيا قدرها 2300 kJ/kg وبسرعة 350 m/sec. إذا خرج البخار المتكثف من المكثف بانثالبيا قدرها 160 kJ/kg وبسرعة 70 m/sec، احسب الحرارة المطرودة من المكثف لكل كيلوجرام من البخار.

السؤال السابع:

الفوهة (nozzle) هي جهاز لزيادة السرعة لمائع ما يسري بصورة مستقرة. إذا كانت انثالبيا المائع عند دخوله الفوهة 3025kJ/kg وسرعته 60 m/sec. إذا كانت الانثالبي عند خروج المائع من الفوهة 2790kJ/kg، احسب سرعة المائع عند الخروج. الفوهة في وضع أفقي وهناك حرارة مفقودة من الفوهة مهملة تماما. احسب أيضا معدل سريان المائع إذا كانت مساحة الفوهة عند الدخول $0.1 m^2$ والحجم النوعي للمائع عند الدخول يساوي $0.19\ m^3/kg$.

السؤال الثامن:

إذا كانت الكفاءة الحرارية لدورة كارنوت والتي تعمل على الهواء كمائع تشغيل هي 40%. وكان الضغط في بداية إجراء التمدد هو 620 kPa والحجم النوعي عند بداية التمدد للهواء 0.1 m^3 والحرارة المضافة للدورة هي 50 kJ/kg، احسب درجة الحرارة القصوى والصغرى لهذه الدورة. (افرض أن الهواء هو غاز مثالي).



السؤال التاسع:

إذا عكست الدورة في المثال السابق، احسب معامل الأداء لدورة كارنوت المعكوسة.

إجابات الاختبار الذاتي

جواب السؤال الأول:

(أ)

١. يعرف النظام الثيرموديناميكي بأنه المادة الموجودة في حيز له حدود معينة ويكون تحت الدراسة. والحدود قد تكون ثابتة أو متحركة. المنطقة حول النظام تسمى المحيط المكتنف أو البيئة المحيطة.

٢. تحدد حالة النظام بواسطة خواص النظام. والإجراء الثيرموديناميكي هو انتقال النظام من حالة إلى أخرى.

٣. العملية الانعكاسية هي العملية التي لو تركت لتغير اتجاهها تعود لنفس حالتها الابتدائية.

٤. الشغل هو القوة × المسافة.

(ب)

كما هو واضح فإن الإجراء يتم تحت ضغط ثابت. باستخدام القانون العام للغازات:

$$pV = mRT$$

ولكن الضغط ثابت.

إذن:

$$\frac{V}{T} = \text{ثابت} \quad \Rightarrow \frac{V_1}{T_1} = \frac{V_2}{T_2}$$

عليه يمكن حساب الحجم عند الحالة (٢) بمعلومية الحجم ودرجة الحرارة عند (١) ودرجة الحرارة عند (٢)

$$\frac{8}{(27+273)} = \frac{V_2}{(7+273)}$$

$$300 \times V_2 = 8 \times 280$$

$$\therefore V_2 = \frac{8 \times 280}{300} = 7.466\ m^3$$

يمكن حساب الشغل:

$$W = \int pdV = p(v_2 - v_1)$$

$$W = 120\ kPa \times (7.466 - 8) = -120000 \times 0.534 = -64080\ J = -64.08\ kJ$$

علامة السالب تدل على أن الشغل معمول بواسطة البيئة على النظام.

جواب السؤال الثاني:

الإجراء هو إجراء ثيرموديناميكي ودرجة الحرارة خلال الإجراء ثابتة. من القانون العام للغازات:

$$pV = mRT$$

يمكن استنتاج أن:

$$pV = \text{ثابت}$$

$$\therefore p_1V_1 = p_2V_2$$

يمكن حساب الشغل من المعادلة:

$$W = p_1V_1 \times \ln\frac{V_2}{V_1}$$

$$W = 200 \times 2 \times \ln\frac{4}{2} = 277.26\ kJ$$

الشغل شغل موجب وبالتالي هو شغل تمدد معمول بواسطة النظام على البيئة

جواب السؤال الثالث:

الإجراء هنا هو إجراء ذو ضغط ثابت وبالتالي فإن الشغل يعطى بواسطة المعادلة التالية:

$$W = p(V_2 - V_1)$$

الضغط يعمل على المكبس، إذن البيئة تعمل على النظام وبالتالي العملية هنا هي عملية انضغاط.

بافتراض أن المكبس يتحرك من نقطة ما مسافة 8 cm فإن التغير في الحجم يمكن أن يحسب من المعادلة التالية:

$$V_2 - V_1 = \frac{\pi}{4}d^2(0 - 0.08) = -\frac{\pi}{4} \times (0.075)^2 \times 0.08 = -0.00035343\ m^3$$

إشارة السالب تدل على أن العملية عملية انضغاط وبالتالي فالحجم في الحالة الأولى يكون أكبر من الحجم في الحالة الثانية.

نعوض في معادلة الشغل:

$$W = p(V_2 - V_1)$$

$$W = 2.3 * 10^6 \times (-0.00035343) = -812.9\ J$$

جواب السؤال الرابع:

الشغل في الإجراء الأدياباتيكي يعطى بواسطة المعادلة التالية:

$$W = \frac{p_1V_1 - p_2V_2}{k-1}$$

هنا لابد من حساب الضغط في الحالة الثانية p_2.

$$p_2 = p_1\left(\frac{V_1}{V_2}\right)^k = 620\times\left(\frac{0.15}{1.0}\right)^{1.5} = 620\times 0.0581 = 36.02\ kPa$$

$$\therefore W = \frac{620\times 0.15 - 36.02\times 1.0}{1.5-1} = \frac{56.98}{0.5} \approx 114\ kJ$$

جواب السؤال الخامس:

(أ) القانون الأول للديناميكا الحرارية ينص على أنه إذا خضع أي نظام لدورة ثيرموديناميكية فإن محصلة الحرارة المضافة تساوي محصلة الشغل المبذول بواسطة النظام على البيئة.

القانون الأول يطبق على النظام المقفول وينص على أن محصلة الحرارة والشغل تساوي التغير في الطاقة الداخلية:

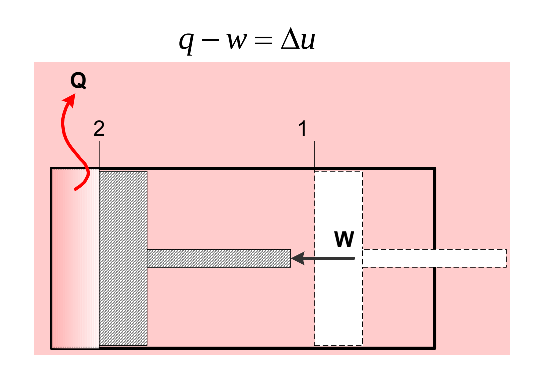
$$q - w = \Delta u$$

القانون الأول يطبق على النظام المفتوح وينص على أن مجموع الطاقات الداخلة للنظام تساوي مجموع الطاقات الخارجة من النظام:

$$\dot{m}(h_1 + \frac{c_1^2}{2} + z_1 g) + Q - W = \dot{m}(h_2 + \frac{c_2^2}{2} + z_2 g)$$

(ب) المثال يوضح نظاماً مغلقاً. الطاقة الداخلية في بداية الشوط تساوي الطاقة الداخلية في نهاية الشوط. وبالتالي فإن التغير في الطاقة الداخلية يساوي صفر. نطبق القانون الأول للديناميكا الحرارية لنظام مغلق.

$$q - w = \Delta u$$



$$50 - w = 0$$

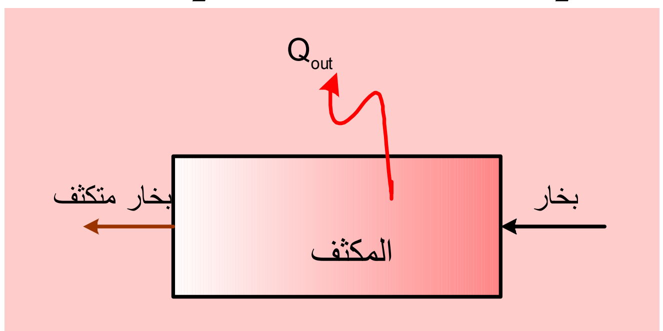
$$\therefore w = 50 \, kJ/kg$$

جواب السؤال السادس:

الشكل يوضح المكثف للسؤال السادس.

نطبق القانون الأول للديناميكا الحرارية على المكثف. ليس هناك شغل على أو من النظام. التغير في طاقة الوضع يساوي صفر.

$$\dot{m}(h_1 + \frac{c_1^2}{2} + z_1 g) + Q - W = \dot{m}(h_2 + \frac{c_2^2}{2} + z_2 g)$$



إذا افترضنا أن معدل سريان البخار يساوي كيلوجرام واحد في الثانية وسرعة البخار عند الدخول هي c_1 وعند الخروج هي c_2 فإن القانون الأول يمكن أن يختصر كالآتي:

$$h_1 + \frac{c_1^2}{2} + Q = h_2 + \frac{c_2^2}{2}$$

يمكن أن نعوض القيم المعطاة في المثال:

$$2300 + \frac{(350)^2}{2} + Q = 160 + \frac{(70)^2}{2}$$

$$2300 + 61.250 + Q = 160 + 2.450$$

$$\therefore Q = -2198.8 \, kJ/kg$$

علامة السالب تدل على أن الحرارة مطرودة من النظام.

جواب السؤال السابع:

نطبق القانون الأول للديناميكا الحرارية على الفوهة باعتبارها نظاماً ثيرموديناميكياً مفتوحاً مع إهمال الشغل والحرارة وطاقة الوضع ذلك أن الفوهة في وضع أفقي.

$$h_1 + \frac{c_1^2}{2} = h_2 + \frac{c_2^2}{2}$$

$$3025 \times 1000 (J/kg) + \frac{60^2}{2} (J/kg) = 2790 \times 1000 (J/kg) + \frac{c_2^2}{2}$$

$$3025000 + 1800 - 2790000 = \frac{c_2^2}{2}$$

$$\frac{c_2^2}{2} = 236800$$

$$\therefore c = \sqrt{236800 \times 2} = 688 \ m/sec$$

لحساب معدل السريان $\dot{m}$:

معدل السريان $\dot{m}$ يساوي حاصل ضرب الكثافة (مقلوب الحجم النوعي) في مساحة المقطع في السرعة:

$$\dot{m} = \rho \times A \times c = \frac{A \times c}{v}$$

$$\dot{m} = \frac{0.1 \times 688}{0.19} = 31.6 \ kg/sec$$

جواب السؤال الثامن:

لحساب درجة الحرارة القصوى T_1 تخدم القانون العام للغازات:

$$p_1 \times v_1 = R \times T_1$$

$$\therefore T_1 = \frac{p_1 \times v_1}{R} = \frac{620 \times 10^3 \times 0.1}{287} = 216\ K$$

نحسب درجة الحرارة الصغرى T_L من تعريف الكفاءة الحرارية لدورة كارنوت:

$$\eta_{therm} = 1 - \frac{T_L}{T_H}$$

$$0.4 = 1 - \frac{T_L}{216}$$

$$\therefore T_L = 129.6\ K$$

جواب السؤال التاسع:

$$COP_{ref} = \frac{T_L}{T_H - T_L} = \frac{129.6}{216 - 129.6} = 1.5$$